

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie a kartografie



Alois Burian

HYDROLOGICKÉ SUCHO V POVODÍ LODĚNICE

Hydrological drought in the Loděnice basin

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. RNDr. Bohumír Janský, CSc.

Praha 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

podpis

V Praze dne 10. 5. 2019

.....

Poděkování:

Zvláštní poděkování patří vedoucímu své práce prof. RNDr. Bohumírovi Janskému, CSc., který mi po celou dobu ochotně předával cenné rady a připomínky, jež obohatily moji bakalářskou práci. Rovněž bych mu chtěl poděkovat za veškerý čas, který mi během psaní práce věnoval. Děkuji taktéž mé rodině a přátelům, kteří mě naplno podporovali nejen po dobu psaní této práce.

Zadání bakalářské práce

Hydrologické sucho v povodí Loděnice

Hydrological drought in the Loděnice basin

Cíle práce

Cílem práce zhodnocení stavu hydrologického sucha v povodí Loděnice se zaměřením na suchá období v minulosti a současnosti.

Použité pracovní metody, zájmové území a vybrané datové zdroje

První částí práce je literární rešerše, která představí sucho jako velmi aktuální fenomén vyskytující přírodní sféře. Součástí rešerše je fyzickogeografická charakteristika zájmového území. Praktická část se zaměřuje na vyhodnocení hydrologického sucha pomocí metod prahové hodnoty a nedostatkových objemů. Zhodnoceny jsou zároveň odtokové charakteristiky vodního toku Loděnice. Vstupními daty jsou průměrné denní průtoky z profilu Loděnice. Tyto data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem.

Datum zadání: 20. 11. 2018

Jméno studenta: Alois Burian

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: prof. RNDr. Bohumír Janský, CSc.

Podpis vedoucího práce:

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je analýza současné situace vybraného povodí Loděnice, které v posledních letech trpí výrazným suchem. První částí práce je literární rešerše, která na základě rozboru domácí a zahraniční literatury analyzuje sucho jako velmi komplexní jev. V práci je popsána jeho geneze, vazby na ostatní druhy sucha. Dále jsou představeny ukazatele sucha a vyvozeny jeho možné následky. Součástí rešerše je fyzickogeografická charakteristika zájmového území. Na základě dat získaných od ČHMÚ je v praktické části představen odtokový režim toku Loděnice se zaměřením na suchá období v minulosti i současnosti. Hydrologické sucho je vyhodnoceno pomocí metody prahové hodnoty a nedostatkových objemů. Na základě těchto metod bylo zjištěno, že povodí Loděnice je v poslední době stále pod větším vlivem hydrologického sucha, zejména v období srpna a září.

Klíčová slova: hydrologické sucho; odtokový režim; nedostatkové objemy; metoda prahové hodnoty; Loděnice

Abstract

The aim of the bachelor thesis is to analyse of the current situation of the selected basin of Loděnice which has suffered a significant drought in recent years. The first part of the thesis is a literary research which presents drought as a complex phenomenon. The literary research is based on domestic and foreign literature. The thesis describes its genesis, connections with other types of drought, indicators of drought and possible consequences. The research includes physical–geographical characteristics of the area. The practical part is based on the data obtained from the CHMI (Czech Hydrometeorological Institute) and introduces the runoff regime of Loděnice river with a focus on the period of drought in the past and now. Hydrological drought is evaluated using the threshold limit method and deficit volumes. It has been detected that the basin of Loděnice is still under the larger impact of hydrological drought, especially in August and September.

Keywords: hydrological drought; runoff regime; deficit volumes; threshold limit method, Loděnice river

Obsah

1. ÚVOD	8
2. CÍLE A NÁPLŇ PRÁCE	10
3. GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA POVODÍ.....	11
3.1 VYMEZENÍ ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ	11
3.2 FYZICKOGEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA POVODÍ.....	12
3.2.1 Orografické a geomorfologické poměry	12
3.2.2 Geologické poměry	14
3.2.3 Hydrologické a hydrografické poměry	17
3.2.4 Biogeografické poměry	23
3.2.5 Pedologické poměry	25
3.2.6 Klimatické poměry.....	26
4. SUCHO.....	29
4.1 DEFINICE SUCHA	29
4.2 TYPY SUCHA	30
4.3 PŘÍČINY SUCHA	31
4.3.1 Fyzickogeografické faktory.....	31
4.3.2 Antropogenní faktory.....	32
4.3.3 Vliv odtokového režimu	33
4.4 UKAZATELE SUCHA.....	34
4.4.1 Indexy hydrologického sucha	34
4.5 DOPADY SUCHA	40
4.5.1 Environmentální dopady	41
4.5.2 Ekonomické dopady.....	42
4.5.3 Sociální dopady	42
5. ANALÝZA PROJEVŮ HYDROLOGICKÉHO SUCHA V POVODÍ LODĚNICE	44
5.1 METODIKA	44
5.1.1 Datové zdroje	44
5.1.2 Použité metody	44
5.2 ODTOKOVÉ POMĚRY POVODÍ	46
5.3 VARIABILITA DENNÍCH PRŮTOKŮ	46
5.3.1 Průměrné denní průtoky.....	47
5.3.2 Průměrné měsíční průtoky.....	49
5.3.3 Průměrné roční průtoky	51
5.4 HYDROLOGICKÉ SUCHO NA LODĚNICI.....	53

5.4.1	<i>Hodnocení na základě suchých dní</i>	53
5.4.2	<i>Analýza nedostatkových objemů.....</i>	54
5.4.3	<i>Sucho na Loděnice v letech 2017 a 2018</i>	56
5.4.4	<i>Povodně v roce 2013</i>	65
6.	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE	69
7.	ZÁVĚR.....	73
8.	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE DAT	75
8.1	LITERATURA	75
8.2	DIGITÁLNÍ A DATOVÉ ZDROJE.....	78
9.	SEZNAM TABULEK, GRAFŮ A OBRÁZKŮ	80
9.1	TABULKY	80
9.2	GRAFY.....	80
9.3	OBRÁZKY	81

1. ÚVOD

Voda je nejdůležitější složkou přírody, bez které by lidský život nemohl existovat. Již od počátku lidských civilizací byla voda využívána, ať už šlo o vodu pitnou či vodu potřebnou v zemědělství či průmyslu. Výskyt vody na Zemi však může přinášet mnoho negativních dopadů. Jedním z nich může být například nedostatek vody v důsledku probíhající klimatické změny, která se projevuje nárůstem teplot a změnou v rozložení srážek během roku. Tato práce se zabývá jedním z extrémů výskytu vody, a to hydrologickým suchem. Sucho jako takové je součástí celého koloběhu vody na Zemi. Jedná se o hydrologický jev, který je výsledkem nedostatku vody v určité klimatické oblasti. V současné době je hydrologický cyklus rychlejší a intenzivnější, což může mít za následek častější výskyt dvou hydrologických extrémů – sucha a povodní. Oba dva extrémy jsou hydrologickou situací extrémního charakteru, jenž v je v poslední době stále aktuálnějším tématem. V dnešní době patří sucho mezi největší přírodní hrozby, které se na našem území vyskytují. Sucho se tak mnohem více dostává do popředí výzkumného zájmu. Problémem sucha je obtížná predikce v důsledku jeho nenápadného nástupu. Vzhledem k tomu, že sucho postihuje celý svět, v každém regionu se může projevovat jinak a zároveň může mít i odlišné příčiny, které se podílejí na jeho vzniku.

Česko bývá často označováno za „střechu Evropy“, což znamená, že k nám přitéká pouze minimum vody a naše vodní zdroje jsou výhradně závislé na atmosférických srážkách. V důsledku toho jsou tedy mnohem více ovlivněny extrémními hydrologickými jevy. V posledních desetiletích je díky několika katastrofickým událostem pozornost věnována obzvláště povodním. Jejich vývoj a postup je v české legislativě dobře zakotven a definován. V případě sucha však nikoli. Sucho je pro Česko v podstatě nový jev, který je však v poslední době stále častější a podle prognóz bude v budoucnu normálním stavem. Proto je potřeba se na sucho dobře připravit a zavést vhodná opatření vedoucí k jeho zmírnění. Velkou roli v tom může hrát dnešní filozofie vodního hospodářství, která klade stále větší důraz na přirozenou retenci vody v povodí.

Tato práce se zabývá studiem hydrologického sucha na první pohled málo atraktivní oblasti Středočeského kraje, konkrétně povodím Loděnice. Jedná se o oblast trpící dlouhodobě nedostatkem srážek. Sousední geomorfologický celek, Kladenská tabule, kde jsou srážkové úhrny nižší než 500 mm, bývá označován jako jedna z

nejsušších oblastí Česka. Vodní tok Loděnice, místně nazýván jako Kačák, pramení ve vrchovině Džbán.

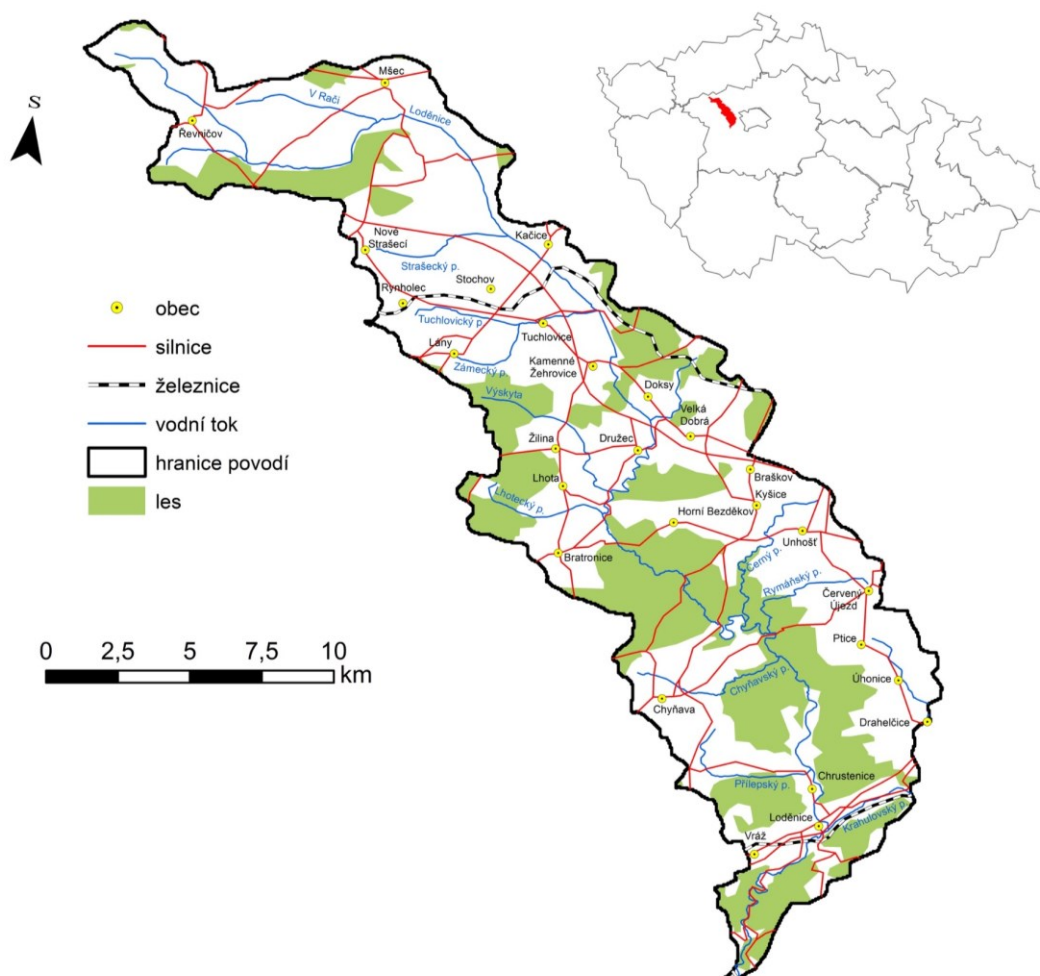
2. CÍLE A NÁPLŇ PRÁCE

Předložená bakalářská práce se zaměřuje na stav hydrologického sucha v povodí vodního toku Loděnice. Jedná se o oblast, která částečně leží ve srážkovém stínu Krušných hor a dlouhodobě tak trpí nedostatkem srážek. Hlavním cílem práce je analyzovat hydrologické sucho ve vybraném povodí. Úkolem je zachytit stále prohlubující se trend sucha postihující tuto oblast. Důraz je kladen na vyhodnocení suchých period v posledních letech. V teoretické části je provedena literární rešerše na problematiku sucha, přičemž jsou popsány jeho typy a příčiny, které podmiňují vznik hydrologického sucha. Představeny jsou také indexy, pomocí kterých lze hydrologické sucho měřit. Součástí teoretické části je vymezení zájmového území z hlediska fyzickogeografických poměrů. Ve druhé části bakalářské práce je hydrologické sucho agregováno na vybraný vodní tok. Na základě získaných dat jsou vyhodnoceny odtokové charakteristiky, díky nimž je popsán hydrologický režim Loděnice se zaměřením na suchá období v minulosti a současnosti.

3. GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA POVODÍ

3.1 Vymezení zájmového území

Povodí Loděnice se nachází ve středních Čechách, na jihu a jihozápadě okresu Kladno. Z části zasahuje i do přilehlých okresů Beroun, Rakovník a Praha – Západ. Vodní tok se dá rozdělit na 3 části: horní, střední a dolní tok. Při horním toku se nachází odlesněná krajina s velkým počtem rybníků, která je využívána k intenzivnímu zemědělství. Střední část toku protéká přírodním parkem Povodí Kačáku, ve kterém převažují jehličnaté a smíšené lesy. Dolní část vodního toku zasahuje do území CHKO Český kras. Jeho koryto se zařezává do hlubokého kaňonovitého údolí, které je převážně zalesněno.



Obrázek 1: Schematická mapa povodí. Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, DIBAVOD.

3.2 Fyzickogeografická charakteristika povodí

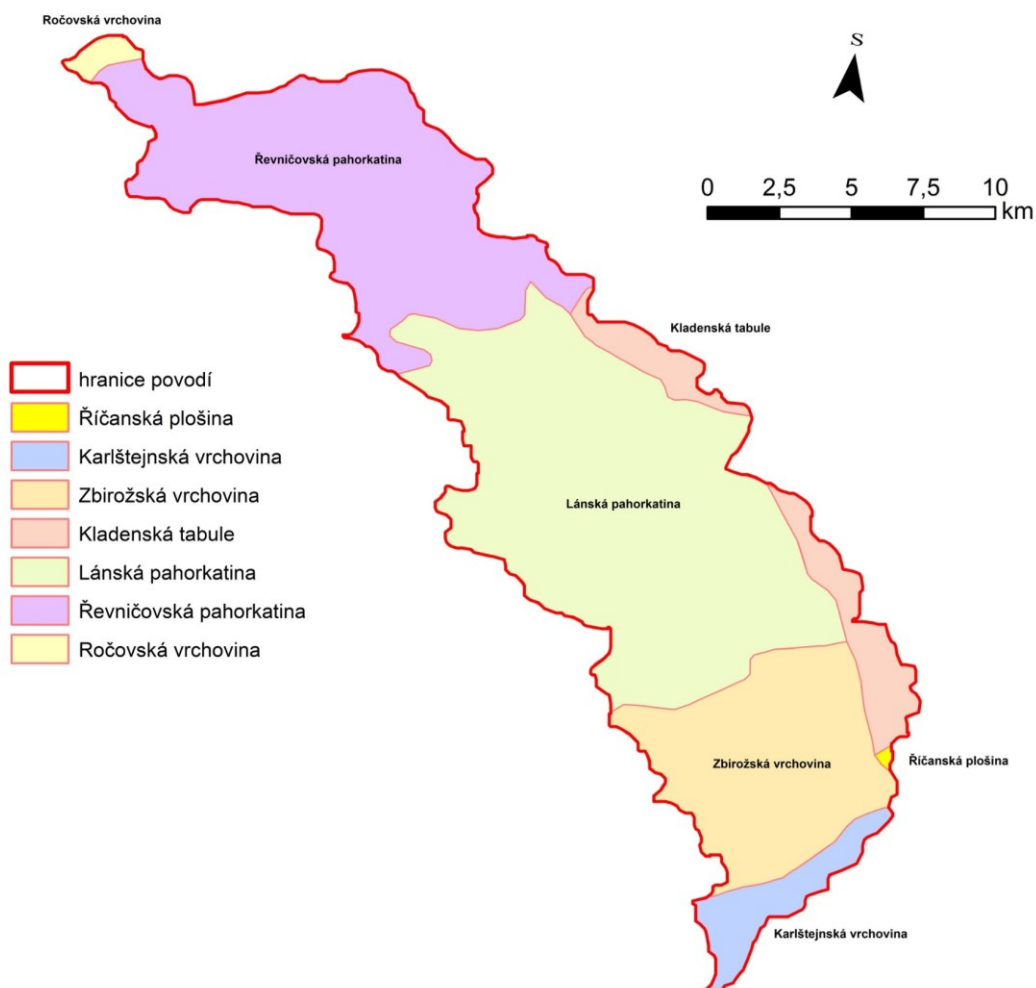
3.2.1 Orografické a geomorfologické poměry

Povodí Loděnice náleží celým svým územím do Poberounské subprovincie, která má rozlohu 8056 km² a zabírá tak 10,2 % území Česka. Regionální geomorfologické členění vymezuje v Poberounské soustavě dvě podsoustavy, přičemž jednou z nich je Brdská podsoustava. Tato podsoustava se dělí na pět celků – Džbán, Pražská plošina, Křivoklátská vrchovina, Hořovická pahorkatina a Brdská vrchovina, do které však už povodí Loděnice nesahá (Bína, Demek 2012). Podobně jsou geomorfologické jednotky děleny i v práci od Balatky a Kalvody (2006).

Horní tok, tedy od pramene k obci Kačice, spadá do celku Džbán. Tento celek se dělí na dva podcelky. Ročovská vrchovina se střední výškou 402 m a středním sklonem 6° 16' zasahuje do povodí pouze malým územím při východním svahu jejího nejvyššího vrcholu Džbánu (536 m n. m.). Druhým podcelkem je Řevničovská pahorkatina, která má střední výšku 425 m a střední sklon 3° 55'. V maximu (Loustín, 535 m n. m.) je jen o 1 m nižší než Ročovská vrchovina. Pro zdejší reliéf je typická svahová modelace, při které dochází k sesuvům a odlamování křídových vrstev v příkrých stěnách, které místy lemují okraje plošin a naznačují tendenci k rozšiřování údolí. Významným prvkem reliéfu jsou erozní rýhy a strže. Pro genezi povrchových tvarů jsou důležité šterkopísky patrně třetihorního stáří, zjištěné u Mšece (Bína, Demek 2012).

Území střední části vodního toku spadá území ke geomorfologickému celku Křivoklátská vrchovina, která se taktéž dále dělí na dva podcelky. Prvním z nich je Lánská pahorkatina, která svým územím zasahuje do povodí v oblasti mezi obcí Kačice a soutokem Loděnice s Chyňavským potokem. Jedná se o pahorkatinu se střední výškou 395 metrů a se středním sklonem 4° 16'. Lánská pahorkatina představuje plošně zvlněný erozně denudační reliéf se zbytky zarovnaných povrchů. Nejvyšším vrcholem je Tucholín (488 m n. m.). Druhým podcelkem je Zbirožská vrchovina, která do povodí zasahuje jen z malé části, a to od soutoku Loděnice s Chyňavským potokem k obci Loděnice. Jedná se o velmi členitou pahorkatinu, která je u nás jedním z nejlepších příkladů krajiny se strukturním (strukturně denudačním) georeliéfem. Zbirožská vrchovina s nejvyšším bodem Radeč (721 m n. m.) má střední výšku 432 metrů a střední sklon 6° 06', což je o poznání více než již zmíněné geomorfologické podcelky. Důležitými prvky reliéfu jsou různé antropogenní tvary – odvaly, lomy a hliniště (Bína, Demek 2012, Demek 1987).

Dalším celkem zasahujícím do povodí Loděnice je Pražská plošina, která má také dva podcelky. Říčanská plošina zasahuje do povodí plošně jen velmi malým územím západně od Rudné. Druhým podcelkem je Kladenská tabule s nejvyšším bodem Na rovinách (435 m n. m.). Jde o členitou pahorkatinu se střední výškou 310 metrů a se středním sklonem 2° 54' (Bína, Demek 2012).



Obrázek 2: Geomorfologické poměry v povodí Loděnice. Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, AOPK.

Nejzajímavější oblastí povodí Loděnice je území při dolní části toku. Rozkládá se zde poslední z celků, a to Hořovická pahorkatina, která zasahuje do povodí svým podcelkem Karlštejská vrchovina (okres Bubovická vrchovina). Jedná se o mírně zvlněný, strukturně denudační reliéf, který vystupuje strmými svahy nad své okolí. Rozdílná odolnost hornin zde v minulosti zapříčinila vznik reliéfu s ostře odlišenými vrchovinnými a vhloubenými jednotkami. Loděnice se zde zařezává do hlubokého údolí,

místy až kaňonovitého rázu. Tato oblast je známa celou řadou krasových jevů. Nachází se zde velké množství jeskyní, z nichž nejznámější leží u obce Svatý Jan pod Skalou – jeskyně Na Průchodě, Pod křížem a Maštale. Nad touto obcí se tyčí přes 200 metrů vysoká skalní stěna. Mezi obcemi Svatý Jan pod Skalou a Hostímí jsou typickým prvkem reliéfu kozí hřbety a kuesty, které vznikly monoklinální geologickou stavbou a přítomností erozně odolných vápenců (Bína, Demek 2012, Demek 1987).

3.2.2 Geologické poměry

Zájmové území je geologicky velmi pestré. Na většině území se vyskytují útvary Českého masívu. Velké množství odkryvů se nachází na dolním toku Loděnice, kde můžeme sledovat stavbu a vývoj jednotlivých vrstev (Kvášovský 2005). Regionální geologické členění podle Mísaře a kol. (1983) dělí Český masív do třech hlavních skupin: 1) předplatformní krystalinické jednotky a zvrásněné paleozoikum, 2) limnický permokarbon a 3) platformní jednotky (pokryvy). V předplatformní krystalinické jednotce spadá území do středočeské oblasti, která se dále dělí na barrandienské proterozoikum a barrandienské starší paleozoikum. Z limnického permokarbonu zasahuje do území dílčí jednotka, a to limnická oblast středočeská. Z poslední skupiny zde nalezneme komplexy ze svrchní třídy, terciéru a kvartéru (Kvášovský 2005).

Nejstaršími horninami, které se v povodí vyskytují, jsou zvrásněné horniny svrchního proterozoika. Horní část povodí je tvořena výše zmíněným limnickým permokarbonem a svrchní křídou. Střední část je pokryta svrchnoproterozoickými horninami. Většinou se jedná o prachovce, břidlice a droby (Müller a kol. 1991). Dolní část tvoří nemetamorfované horniny spodního paleozoika, což jsou usazené horniny mělkého moře, které vznikly v době před 90–650 mil. lety. Na počátku spodního paleozoika byla většina Českého masívu souší, což bylo způsobeno horotvornými procesy kadomského vrásnění. Ve středním kambriu byla oblast zaplavena mořem. Vlivem mořské transgrese docházelo k sedimentaci.

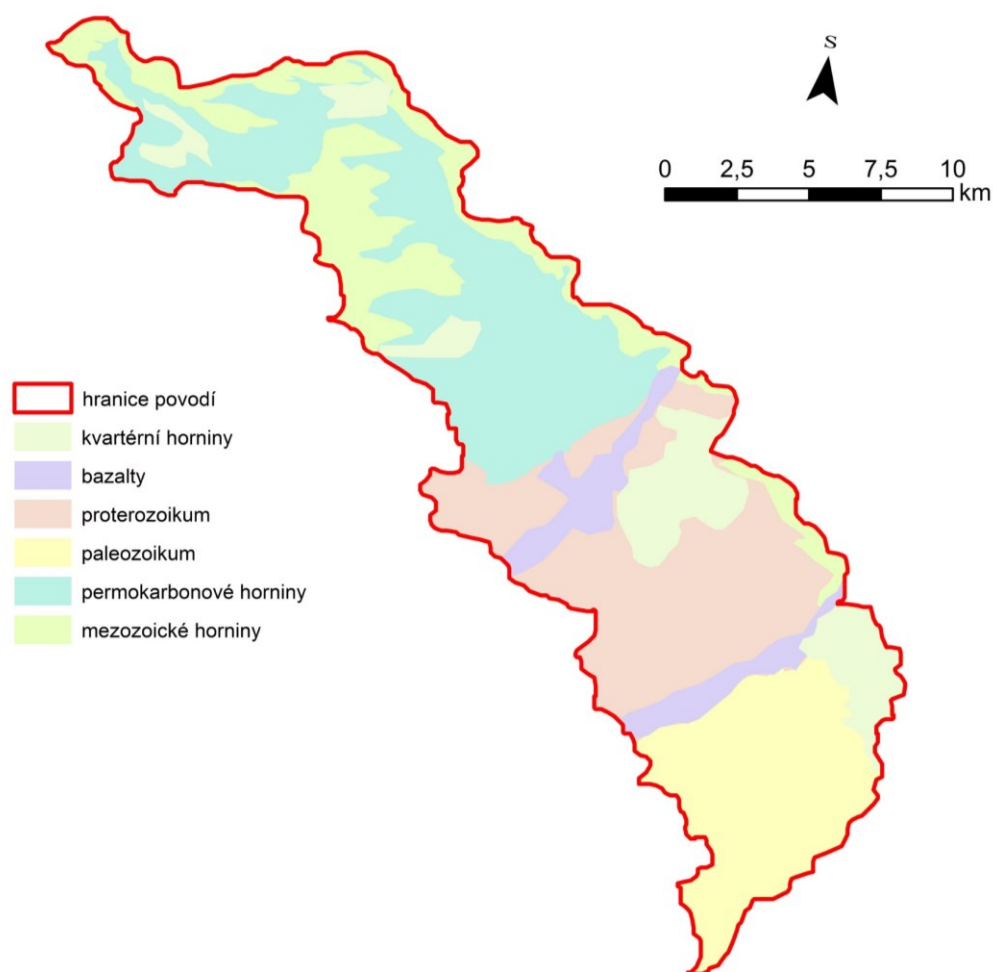
Ke konci středního kambria proběhl ve středních Čechách ústup moře. V povodí je zastoupena celá řada souvrství ordoviku. Ve spodním ordoviku se začala utvářet Pražská pánev, která se rozkládá přibližně mezi Prahou a Plzní a zasahuje tak do povodí Loděnice. Ve středních Čechách dochází opět k mořské transgresi. Ve spodním ordoviku vznikl bazický komplex, který liniově vystupuje východně od Chyňavy přes Libečov až po Ptice. Na konci ordoviku dochází k ústupu moře z Pražské pánve. Před 420 mil. lety,

zpočátku siluru, došlo k oteplení klimatu, což způsobilo tání ledovců a následné zvýšení hladiny moře. Střední Čechy byly v siluru pod velkým tlakem podmořského vulkanismu.

Vznikala bazická magmata oceánského typu, především bazalty. Důkazem toho je svatojanské vulkanické centrum nacházející se v daném povodí, které vytvářelo podmořskou sopku vyčnívající v některých obdobích dokonce nad hladinu moře. Horniny siluru se nachází převážně v okolí obcí Loděnice a Svatý Jan pod Skalou, kde v páslech vystupují na povrch (Chlupáč 1988). V blízkosti obce Loděnice můžeme nalézt zkameněliny pocházející právě ze siluru. Objevit zde můžeme celé trilobity nebo například drobné ramenonožce či mechovky. Mladokaledonské vrásnění, které probíhalo koncem siluru v Severní Evropě, se do středních Čech nedostalo. Proto mají hraniční vrstvy mezi silurem a devonem plynulou mořskou sedimentaci. Devon je ve středních Čechách rozdělen na spodní a střední, a má pouze mořský vývoj (Kvášovský 2005). Devonské sedimenty vystupují na povrch v oblasti mezi Svatým Janem pod Skalou a ústím Loděnice do Berounky. Ve středním devonu končí mořská sedimentace a mimo vápence se začínají objevovat i břidlice a prachovce. Během variského vrásnění došlo ke kompresi barrandienské pánve a ke zvrásnění prvohorních hornin do velkých vrás, což vedlo ke vzniku tektonických poruch a zlomů, podél nichž docházelo k pohybům ker. Jedním ze zlomů je Pražský zlom, který do povodí zasahuje. V karbonu se po ukončení variského vrásnění stal Český masív částí variského horstva. Po variském vrásnění vznikly deprese ležící mezi horskými pásmy, které začaly tvořit nové prostory pro sedimentaci. Ve svrchním karbonu se v nich začal usazovat klastický materiál, který byl přinášén vodními toky z přilehlých regionů. Proces sedimentace přetrval až do permu. Celá centrální část Českého masívu byla od svrchního permu až do spodní křídý souší. Z klimatického hlediska zde bylo teplo, převažovalo subtropické a tropické podnebí aridního až humidního typu. Po celou dobu docházelo k zarovnávaní povrchu a ke zvětřování hornin. Výsledkem byla denudace většiny Českého masívu do stadia paroviny ve spodní křídě (Chlupáč 1988). V povodí Loděnice nalezneme křídové sedimenty, které jsou denudačními relikty jihozápadního okraje české křídové pánve. V terciéru došlo k ústupu moře a začalo alpínské vrásnění, které však Český masív takřka minulo. Ve starších třetihorách pokračovalo nadále zvětřování hornin a proces denudace na parovinu zde dosáhl svého maxima. Všechny řeky proudily severozápadním směrem. Měly velmi mírný spád a malou unášecí schopnost, takže proces eroze a transportu zde nebyl tak výrazný. Dnešní říční síť se začala tvořit ve svrchním miocénu/pliocénu. Ve čtvrtihorách, asi před 2 mil. let, došlo k celkovému ochlazení klimatu. Střídala se studená a teplá

období. V pleistocénu se začaly tvořit větrné, říční a svahové sedimenty. V holocénu se začaly utvářet nivní sedimenty a zároveň v této době dochází zde ke vzniku půd.

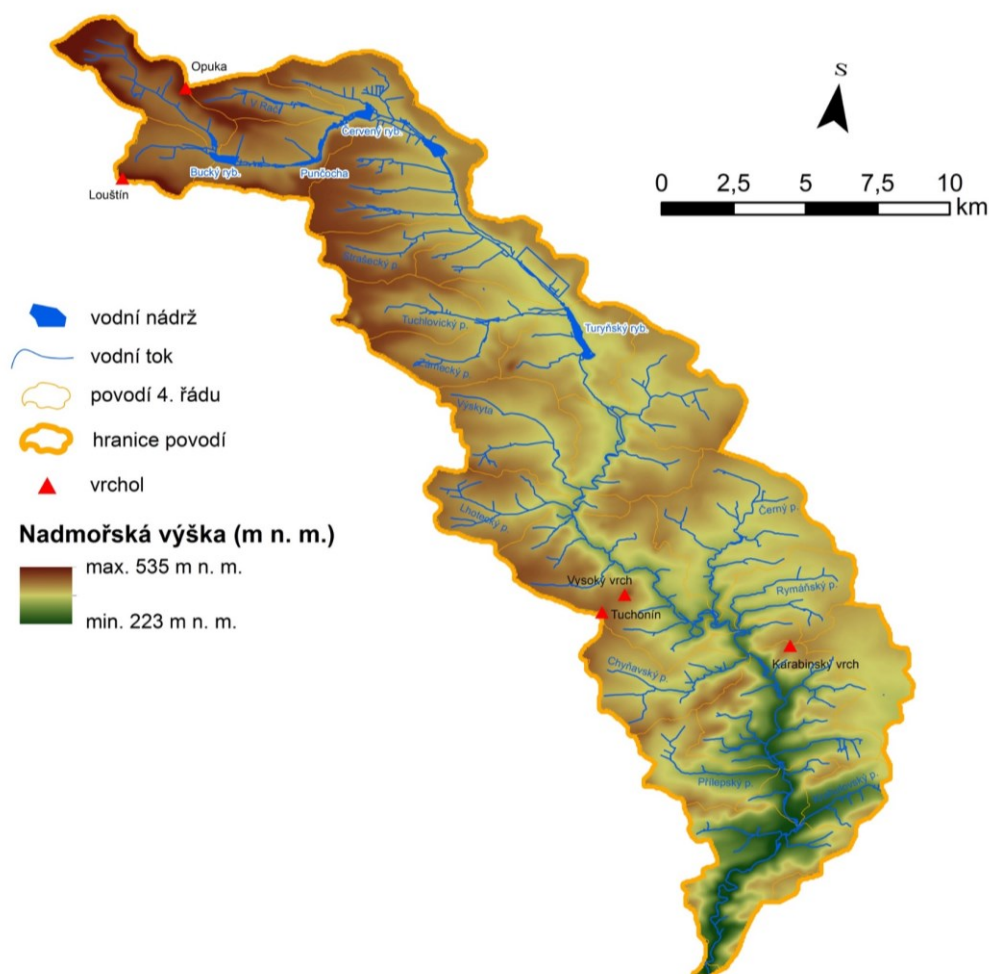
Kvartérní sedimenty převážně pokrývají starší horniny. Horní tok Loděnice je pokryt sprašemi a sprašovými hlínami s příměsí klastů pevných hornin. Spraše se také nachází na území mezi obcemi Doksy a Unhošť. Fluviální písčité štěrky nalezneme v meandrech řeky Loděnice u Malých Kyšic. Ve Svatém Janu pod Skalou se nachází pěnovecová kupa tvořena zbytky holocenních hornin. Je vysoká 12 metrů, 70 metrů dlouhá a 80 metrů široká (Chlupáč 1988).



Obrázek 3: Geologické poměry v povodí Loděnice. Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, Česká geologická služba.

3.2.3 Hydrologické a hydrografické poměry

Loděnice (1–11–05–001/0 až 1–11–05–027/0) neboli Kačák je levostranný přítok Berounky. Jedná se o vodní tok IV. řádu spadající do povodí Labe. Správcem povodí je ovšem státní podnik Povodí Vltavy. Pramení v pohoří Džbán na východním svahu stejnojmenného vrcholu (Džbán – 536 m n. m.) v nadmořské výšce 497,22 metrů, asi půl kilometru jihozápadně od obce Kroučová. Ústí do Berounky přibližně 3 km východně od Berouna, mezi obcemi Tetín a Srbsko, na jejím říčním kilometru 30,34 a v nadmořské výšce 210,47 m n. m. Celková délka vodního toku je 64,72 km a plocha povodí je 270,24 km².



Obrázek 4: Hydrografická síť vybraného povodí. Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, DIBAVOD, AOPK.

Po většinu teče Loděnice zhruba jihovýchodním směrem. Do obce Družec vtéká širokým údolím, poté se nápadně zužuje a v dolní části toku má kaňonovitý ráz. Za obcí Malé Kyšice a ve vápencích Českého krasu tvoří vodní koryto sevřené meandry. Výškový

rozdíl pramene a ústí je 286,75 metrů a převýšení povodí 312 metrů. Průměrný sklon řeky je 4 ‰. V horní části toku, v oblastech rybníků, se sklon pohybuje kolem 1,4 ‰. Oproti tomu v pramenné oblasti a pod Svatým Janem pod Skalou dosahuje hodnot kolem 5 ‰ (Kvášovský 2005).

Vybrané hydrografické charakteristiky

Hodnocení tvaru povodí

Graveliův koeficient určuje míru protáhlosti povodí jako poměr délky rozvodnice a obvodu kruhu o ploše, které je totožná s plochou povodí. Hodnoty blíží se číslu 1 určují, že tvar povodí je více podobný kruhu o stejné rozloze.

$$K_G = \frac{L_R}{2\sqrt{P \cdot \pi}}$$

délka rozvodnice $L_R = 153\,700\text{ m}$

plocha povodí $P = 270,24\text{ km}^2$

$$\underline{K_G = 2,638}$$

Koeficient protáhlosti povodí je další z ukazatelů určující protáhlost povodí. Vypočítá se jako poměr průměru kruhu o stejné ploše, jako je plocha povodí, k délce daného povodí. Pohybuje se v intervalu 0 (protáhlé povodí) až 1 (kruhové povodí).

$$R_E = \frac{2\sqrt{\frac{P}{\pi}}}{L}$$

délka povodí $L = 39\,266\text{ m}$ (vzdálenost mezi dvěma nejvzdálenějšími body v povodí)

plocha povodí $P = 270,24\text{ km}^2$

$$\underline{R_E = 0,472}$$

Charakteristika povodí stanovuje tvar povodí jako poměr jeho plochy ke čtverci jeho délky.

$$\alpha = \frac{P}{L^2}$$

přímková vzdálenost od ústí k nejzazšímu bodu $L = 39\,550\text{ m}$

plocha povodí $P = 270,24 \text{ km}^2$

$$\alpha = 0,173$$

Povodí má **protáhlý** tvar.

Koeficient souměrnosti plochy povodí je určen rozdílem ploch povodí pravých a levých přítoků hlavního toku lomený jejich součtem. Nabývá hodnot 0 až 1.

$$K_S = \frac{P_P - P_L}{P}$$

$$P_P = 144,14 \text{ km}^2$$

$$P_L = 126,10 \text{ km}^2$$

$$K_S = 0,06$$

Povodí jako celek je **symetrické**.

Výškopisné poměry povodí

Převýšení je rozdíl výšek dvou bodů, tedy nejvyššího a nejnižšího bodu v povodí.

$$\Delta h = h_{max} - h_{min}$$

$$h_{max} = 535 \text{ m n. m.}$$

$$h_{min} = 223 \text{ m n. m.}$$

$$\Delta h = 312 \text{ m}$$

Průměrný sklon povrchu povodí určuje sklonitost povrchu v povodí. Je určen jako poměr rozdílu nejvyššího a nejnižšího bodu povodí ku odmocnině plochy celého povodí.

$$I = \frac{h_{max} - h_{min}}{\sqrt{P}}$$

$$I = \frac{312}{\sqrt{270,24}}$$

$$I = 18,98 \%$$

Říční síť

Hustota říční sítě udává poměr mezi součtem délek všech vodních toků a plochou povodí. Je dána morfologií povrchu, dále například land-usem nebo půdními, vegetačními a klimatickými faktory.

$$r = \frac{\Sigma L}{P}$$

součet délek vodních toků $\Sigma L = 337,03 \text{ km}$

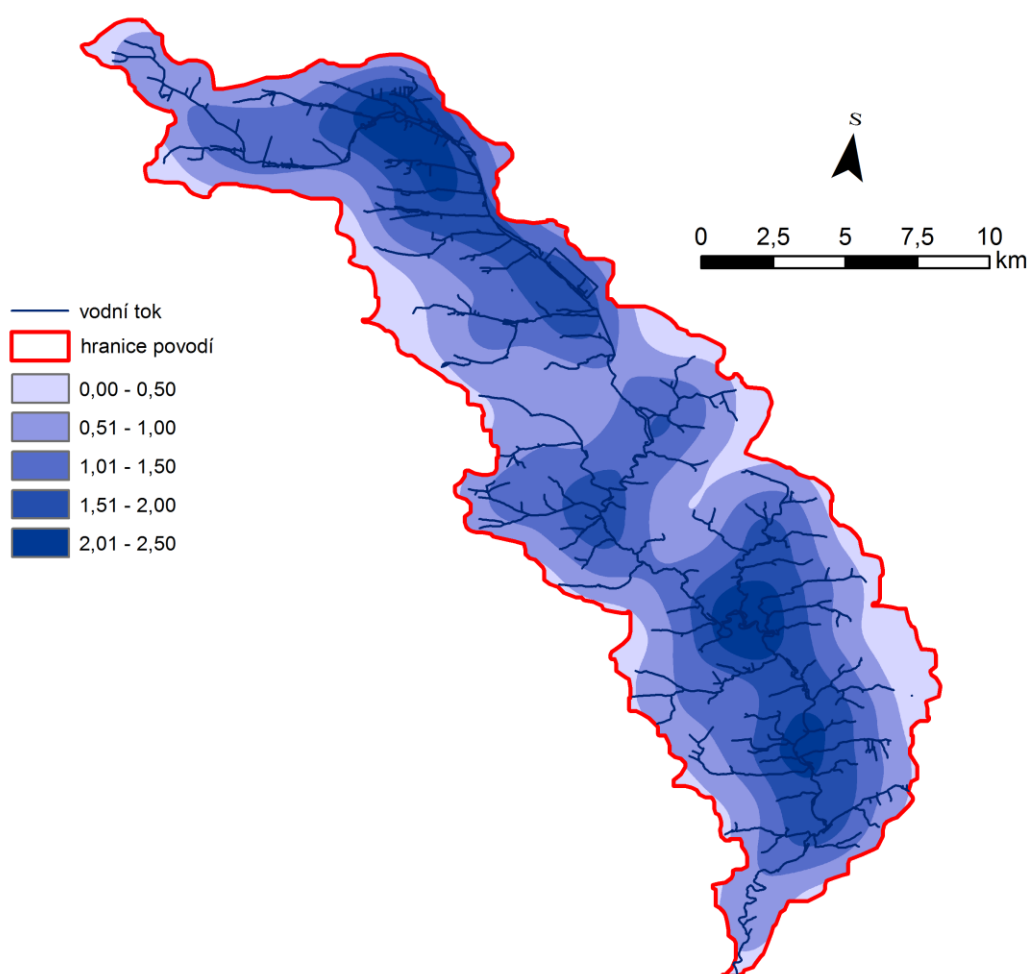
plocha povodí $P = 270,24 \text{ km}^2$

$$\underline{\mathbf{r = 1,24 \text{ km/km}^2}}$$

Uspořádání říční sítě je **stromovité**.

Řádovost říční sítě nám vyjadřuje hierarchii vodních toků v rámci celé říční sítě. Nejčastěji se využívají dva modely. Absolutní řádovost (podle Gravella) nám udává počet dílčích vodních toků podle zaústění od moře, tzn. toky I. řádu ústí do moří/oceánů, toky II. řádu do toků I. řádu atd. V tomto případě je Loděnice tokem IV. řádu. Relativní řádovost (podle Strahlera) charakterizuje pramenné úseky vodních toků jako vodní toky I. řádu. V případě soutoku dvou řek stejného řádu dochází ke zvýšení řádu. Při soutoku dvou toků různého řádu se řád nemění. Říční síť se mění v závislosti na ročním období. Při jarním tání roste počet zdrojnic toku, naopak během podzimního období sucha klesá počet zdrojnic a tím klesá i řádovost. Mapa č. 5 znázorňuje hustotu říční sítě povodí Loděnice. Největší koncentrace vodních toků si lze povšimnout v horní části povodí v oblastech velkých rybníků.

Přítoky Loděnice jsou krátké a dosahují v průměru 5 kilometrů. Největším přítokem je Černý potok o délce 7,76 km. Koeficient souměrnosti povodí je roven hodnotě 0,06, tudíž se dá povodí Loděnice považovat za symetrické. V současné době se tu nachází 229 vodních nádrží s celkovou rozlohou 219,21 ha. Největší vodní plochou je Turyňský rybník, místně známý jako Záplavy, s rozlohou 43,0 ha u obce Kamenné Žehrovice. Nejvíce rybníků bylo vybudováno v horní části toku, kde se nachází soustava tzv. mšeckých rybníků, z nichž největší jsou Bucký, Červený a Lodenický. Jejich rozloha se pohybuje kolem 20 ha.



Obrázek 5: Hustota říční sítě. Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, DIBAVOD.

Tabulka 1: Vybrané rybníky v povodí Loděnice.

Název rybníku	Vodní tok	Plocha (ha)	Objem (1000 m³)
Turyňský	Loděnice	43,0	435
Lodenický	Loděnice	24,0	není uvedeno
Bucký	Loděnice	20,0	200
Červený	Loděnice	20,0	280
Punčocha	Loděnice	13,0	190
Třtický	Loděnice	9,2	139
Mlýnský	Loděnice	7,3	90
Pilský	Loděnice	5,8	80
Vítovský	V Rači	2,0	20
Dvorský	Novodvorský potok	2,0	20

Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, DIBAVOD.



Obrázek 6: Třtický rybník. Zdroj: vlastní fotografie.

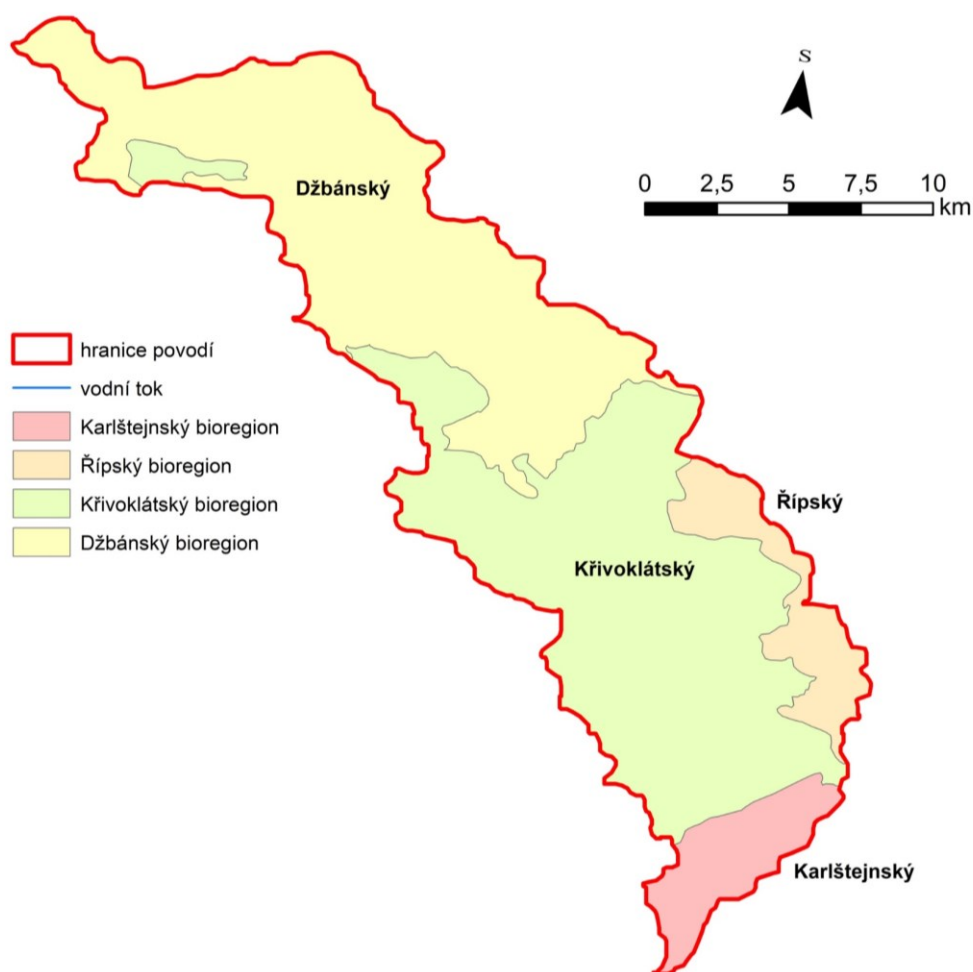
3.2.4 Biogeografické poměry

Na území Česka se nacházejí dvě biogeografické provincie, a to středoevropských lesů a panonská. Biogeografické členění Česka vymezuje čtyři podprovincie. Celé povodí spadá do hercynské podprovincie, která má na území Česka největší zastoupení a představuje biotu centrální a západní části střední Evropy. Hercynská podprovincie se dále dělí na 71 bioregionů. Povodí Loděnice spadá do čtyř – Džbánský, Krivoklátský, Řípský a Karlštejnský (Culek a kol. 1995).

Horní část toku končící obcí Doksy spadá do Džbánského bioregionu, který má celkovou rozlohu 420 km². Krajina je do velké míry ovlivněna člověkem. Velké plochy v okolí Nového Strašecí, Řevničova a Stochova byly dříve odlesněny a nyní slouží k zemědělské výrobě. V této oblasti převažují pole nad loukami a pastvinami. Lesní plochy se nacházejí západně od Nového Strašecí a v oblastech mezi Loděnicí a levostrannými přítoky Vltavy. V lesích dříve převládal dub (45 %), buk (35 %), borovice (9 %) a jedle (5 %). V současné době převládá smrk (60 %). Zachovány jsou však doubravy, dubohabrové háje a květnaté bučiny (Průša 1989).

Krivoklátský bioregion má rozlohu 1 253 km² a svým územím zasahuje do střední části toku od obce Doksy po Nenačovice. Na tomto území došlo ke značné přeměně přirozené skladby dřevin. Dříve převládal dub (44 %), buk (12 %) a ostatní dřeviny, jako například jedle, javor, habr či lípa. V současné době má největší zastoupení smrk (36 %), borovice (21 %) dub (16 %), buk (8 %) a jedle (5 %) (Průša 1989). Zachovány zůstaly dubohabrové háje, květnaté bučiny a doubravy. Jedná se o turisticky velmi oblíbenou oblast. Nezalesněné plochy se nachází v okolí obcí Družec a Chyňava.

Řípský bioregion je sice největší (1 643 km²), ovšem do povodí zasahuje jen velmi malým územím v okolí obcí Velká Dobrá, Unhošť, Červený Újezd a Úhonice. Jedná se o odlesněnou krajinu, ve které převažují pole pro zemědělskou výrobu. Původně na tomto území rostly dubohabrové háje, které byly později odlesněny. V lesích převažuje smrk, místy se zde rozšířil akát (Průša 1989).



Obrázek 7: Bioregiony v povodí Loděnice. Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, AOPK.

Dolní část toku náleží Karlštejnskému bioregionu, který má rolohu 447 km². Jedná se o vcelku zalesněnou oblast, jejíž původní společenstva jsou z velké části vytlačována akátem. V okolí Chrustenic se zachovaly relikty původních dubohabřin. Z ostatních původních společenstev se v malé míře zachovaly bukové doubravy a dubové bučiny. V dnešní době na území převládá dub a jehličnaté dřeviny, které mají zastoupení necelých 35 % (Průša 1989). Vodní tok za obcí Loděnice vstupuje do CHKO Český kras, která byla vyhlášena v roce 1976. Český kras je tvořen malými stepními formaci, které mají velký botanický význam.

3.2.5 Pedologické poměry

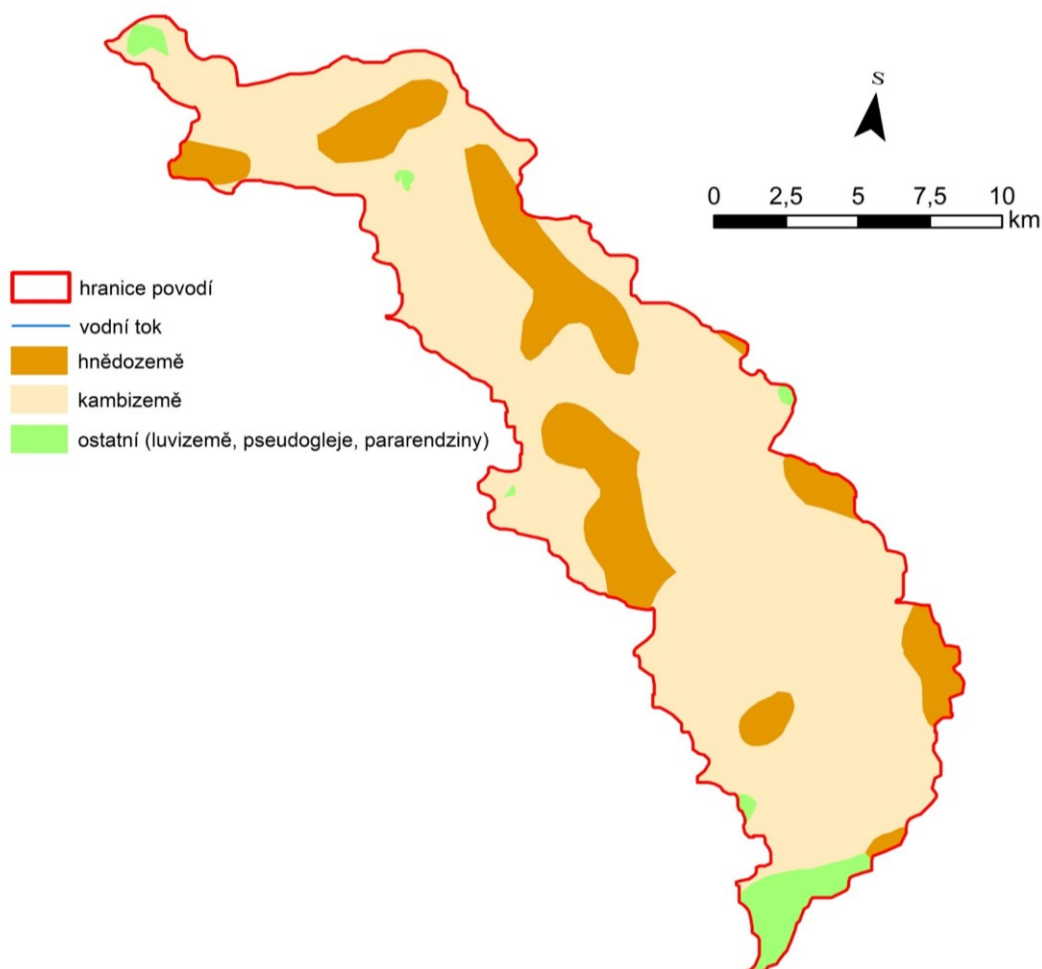
V povodí Loděnice z pedologického hlediska převažují kambizemě a hnědozemě. V menší míře zde můžeme najít luvizemě, pseudogleje a pararendziny. Na některé přítoky se dále vážou fluvizemě a gleje.

Kambizemě se vyskytují převážně v horní části toku a z větší části jsou nasycené. Ve střední části se střídají s hnědozeměmi. Souvislý pokryv dále tvoří od obce Podkozí až do Loděnice. Půdotvorný substrát je tvořen horninami proterozoického a paleozoického stáří. Jedná se převážně o břidlice a droby. Místy se vyvinuly kambizemě eutrofní s vysokým obsahem humusu. Ty leží zejména na bazických horninách, v případě Loděnice na spilitech (Tomášek 2007). Kambizemě bohaté na karbonáty se vyvinuly v oblasti Českého krasu pod lesními porosty. Vznikly na smíšených zvětralinách s vysokým podílem vápenců (Müller a kol. 1991).

Hnědozemě se vyskytují zejména ve střední části toku a vyvinuly se ze spraší a sprašových hlín. Pro hnědozem je charakteristický půdotvorný proces illimerizace, kdy jílové částice jsou prosakující vodou přemisťovány do větší hloubky. V případě hnědozemí je obsah humusu menší než u černozemí (Tomášek 2007). Kolem Chyňavy, Velké Dobré a Červeného Újezdu se vyskytují hnědozemě luvizemní. V celém povodí obecně převažují středně zrnité půdy.

Typické luvizemě se v malém měřítku vyvinuly ze sprašových hlín jižně od obcí Řevničov, Bratronice a Kačice. Pro luvizem je typické časté oglejení, kdy jílem obohacený, zhutnělý horizont nepropouští vodu do spodních pater a na vrchu se tak koncentrují hydratované oxidy železa a manganu do malých bročků (konkrecí). V Česku se luvizemě dále vyskytují například v oblastech České tabule. Pro oblast Českého krasu jsou charakteristické pararendziny, tvořené půdotvorným substrátem z karbonát–silikátových hornin, z nichž nejčastější jsou vápenité břidlice. Hlavním půdotvorným procesem kromě vnitropůdního zvětrávání je proces humifikace. V povodí se v malé míře vyskytují pseudogleje se zvýšeným obsahem humusu. Ty často vznikají v zaplavovaných územích podél vodních toků. Půdotvorným substrátem pseudoglejí jsou sprašové hlíny, hlinité a jílovité glacifluviální uloženiny či samotné jíly. Typické gleje se nachází při dně údolí ve střední části toku. V této oblasti je nepřetržitě vysoká hladina podzemních vod, která obecně podmiňuje vznik glejí. Hlavním půdotvorným procesem je glejový proces, při kterém se hromadí organické látky v půdě (Tomášek 2007). Fluvizemě se vyskytují

v údolním dnu horní a dolní části vodního oku Loděnice. Podmínkou jejich vzniku jsou střídavé záplavy a kolísající hladina podzemních vod. Půdotvorným substrátem jsou zejména nivní uloženiny (říční a potoční náplavy) (Tomášek 2007).

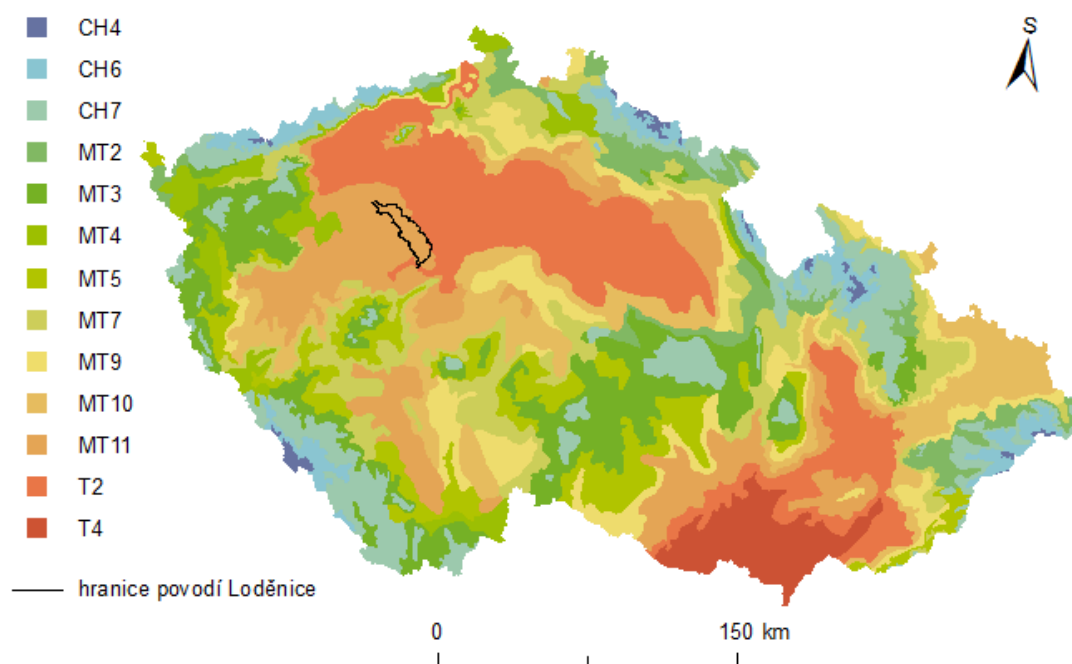


Obrázek 8: Pedologické poměry v povodí Loděnice. Zdroj: ArcČR 500, verze 3.3, AOPK.

3.2.6 Klimatické poměry

Podle Quittovi klasifikace podnebí, kterou publikoval ve svém díle Klimatické oblasti Československa (1971), spadá většina povodí do nejteplejší a nejsušší z mírně teplých oblastí MT 11. Tato klimatická jednotka se vyznačuje mírně teplým a krátkým jarem. Oproti tomu léto je dlouhé, teplé a zároveň suché. Podzim je na tom podobně jako jaro, mírně teplý a krátký. Zima je charakteristická svým krátkým trváním, je mírně teplá a velmi suchá s krátkým trváním sněhové pokrývky. Malé území při ústí Loděnice do Berounky spadá do teplé oblasti T2, která je charakteristická poměrně krátkým, teplým až mírně teplým jarem. Léto je v této klimatické jednotce teplé, dlouhé a velmi suché.

Podzim bývá poměrně krátký, teplý až mírně teplý. Stejně tak i zima bývá vcelku krátká, mírně teplá, suchá až velmi suchá (Quitt 1971). Podle Atlasu podnebí ČSR (1958) povodí Loděnice spadá do mírně teplého okrsku B2, který je totožný s klimatickou jednotkou MT11 podle Quitta.



Obrázek 9: Klimatické poměry v povodí Loděnice. Zdroj: Quitt (1971).

Nejrozšířenější a nepoužívanější klasifikací podnebí je konvenční Köppenova klasifikace, která byla poprvé použita v roce 1884. Autorem je německý klimatolog Wladimir Köppen. Území Česka spadá do čtyř klimatických typů. Povodí Loděnice však zasahuje pouze do jediného, a to do typu Cfb. Jedná se o mírné klima bez suchého období s mírným létem (Belda a kol. 2014). Rozložení srážek během roku je v tomto klimatickém typu rovnoměrné.

Tabulka 2: Klimatické oblasti MT11, T2 a jejich charakteristiky.

	MT11	T2		MT11	T2
Počet letních dní	40–50	50–60	Průměrná teplota říjnu	7–8	7–9
Počet dní s teplotami alespoň 10 °C	140–160	160–170	Počet dní se srážkami alespoň 1 mm	90–100	90–100
Počet mrazových dní	110–130	100–110	Srážkový úhrn ve vegetačním období	350–400	350–400
Počet ledových dní	30–40	30–40	Srážkový úhrn v zimním období	200–250	200–300
Průměrná teplota v lednu	–2 – –3	–1 – –2	Počet dní se sněhovou pokrývkou	50–60	40–50
Průměrná teplota v dubnu	7–8	8–9	Počet jasných dní	120–150	120–140
Průměrná teplota v červenci	17–18	18–19	Počet zatažených dní	40–50	40–50

Zdroj: Quitt (1971).

Povodí Loděnice je částečně ovlivněno srážkovým stínem Krušných hor a řadí se tak mezi suché oblasti. Nedaleká Kladenská tabule je dokonce označována jako jedno z nejsušších míst Česka. Velmi suché podnebí je také na území Českého krasu. Průměrné roční srážky v povodí se pohybují kolem 500–550 mm a průměrné roční teploty mezi 7–8 °C. Velký vliv na teploty v povodí má expozice svahů. Svahy orientované na jih, popřípadě na jihozápad jsou nejteplejší. V pramenné oblasti, která se nachází ve vyšších nadmořských výškách, klesá průměrná teplota pod 7 °C. Oproti tomu při ústí Loděnice do Berounky se pohybují teploty lehce nad průměrem (nad 8 °C). Nejteplejším měsícem v povodí je červenec, nejchladnějším naopak leden.

4. SUCHO

4.1 Definice sucha

Sucho představuje přírodní riziko, které má například oproti povodním pomalý nástup, jeho působení je pozvolné a jeho následky mohou být zřejmé až několik let po jeho skončení. Jde o fenomén, který je přirozenou součástí koloběhu vody na Zemi. Příčiny, které se podílejí na vzniku sucha, projevy a možné následky se mohou lišit v každém regionu. Nelze proto vytvořit jednotnou definici, která by přesně vystihovala tento extrémní jev. Definice autorů, zabývajících se suchem, se proto velmi liší. Ovšem jeden společný rys má sucho stejné všude po světě, jedná se o vždy o vodní deficit oproti běžným hydrometeorologickým podmínkám.

National Drought Mitigation Centre (NDMC) uvádí, že sucho je zcela normální, běžně se opakující projev klimatu, který souvisí s jeho kolísáním. Může se objevovat po celém světě, ve všech klimatických pásmech, avšak jeho charakteristiky se liší podle klimatu v dané oblasti. Vzniká v důsledku absence srážek v interakci s ostatními činiteli, jimiž mohou být například intenzita slunečního svitu či rychlost evapotranspirace. NDMC dává sucho do souvislosti s lidskou činností, která ho může velmi ovlivnit.

Čeští autoři Němec, Hladný a kol. (2006) uvádějí, že sucho jako nedostatek vody není hydrologicky jednoznačně definovatelný pojem. Sami ale řadí sucho k jednomu ze škodlivých účinků vod, což není tak úplně pravda, protože samotné sucho způsobuje škody právě absencí vody. Přesné stanovení začátku a konce sucha je takřka nemožné. Proto bývá sucho někdy označováno jako „plíživý jev“. Uvádějí, že sucho nastává v okamžiku, kdy není dostatek vody ve vodním zdroji pro účelovou potřebu určitého uživatele.

Červený et al. (1984) definuje sucho jako časové období několika týdnů, měsíců či roků, ve kterém bylo zaznamenáno méně srážek oproti dlouhodobému průměru. Dále vymezuje sucho jako období, pro které nebyl splněn předem stanovený minimální srážkový limit. Tento fakt byl použit v klimatických podmínkách střední Evropy.

Jak již bylo zmíněno, z důvodu regionálních rozdílů působení sucha se jeho studiem zabývalo velké množství zahraničních autorů. Gibbs (1975) definuje sucho jako stav množství vody, kterým nelze pokrýt nároky na její využití. Jedná se tedy o deficit vody pro lidskou populaci, živočichy a rostliny.

Tallaksen (2004) uvádí, že sucho je dlouhodobý, opakující se hydrologický jev, který je charakteristický plošným rozsahem nedostupnosti vody a je stanoven místními charakteristikami v daném regionu. Autoři Wilhite a Glanz (1985) našli celkem 150 definic, které na sucho pohlíží z několika úhlů. Tyto definice roztřídili do dvou kategorií. První kategorie, pojmová, obsahovala definice v rámci obecné roviny. Druhou kategorií pojmenovali funkční. Ta obsahovala již zřejmé ukazatele intenzity, počátku a konce a doby trvání sucha.

4.2 Typy sucha

Z důvodu mnoha rozdílných definic lze také těžce stanovit přesné typy sucha, které by ho dokonale vystihovaly. Sucho se tak podle většiny autorů dělí nejčastěji do čtyř základních typů tak, jak postupují hydrologickým cyklem.

Meteorologické sucho je udáváno jako počáteční stav sucha, který vzniká v důsledku nepříznivého stavu atmosféry, kdy je vlivem atmosférických činitelů snížen počet srážek na daném území. Bývá obvykle charakterizováno počtem dnů s nedostatečným srážkovým úhrnem, respektive jako odchylka srážek od dlouhodobého normálu v určitém časovém období (Tallaksen 2004). Meteorologické sucho se dá určit pomocí různých klimatologických indexů. Mezi nejčastěji používané indexy patří standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI), standardní srážkový index (SPI) nebo tzv. Palmerův index intenzity sucha (PDSI) (Peña – Gallardo a kol. 2019). Při studiu meteorologického sucha se mnohdy přihlíží k ostatním faktorům, jako například k teplotě vzduchu, rychlosti větru či evapotranspiraci (Němec, Hladný 2006)

Agronomické sucho vzniká v důsledku působení meteorologického sucha a je tedy další fází při vývoji sucha (Kašpárek 2009). Objevuje se v případě, kdy půda nemá dostatečné množství vody a nemůže půdní vláhu dále předávat plodinám (Tallaksen 2004). Intenzita agronomického sucha závisí na konkrétních typech pěstovaných rostlin a na úrovni zemědělské techniky. Zaměstlavství je zpravidla prvním hospodářským sektorem, na kterém se sucho projeví (Němec, Hladný 2006)

Při dlouhodobém deficitu srážek a nadměrné evapotranspiraci, tedy prohloubení meteorologického a agronomického sucha, nastává tzv. *hydrologické sucho*, které vede k poklesu hladiny na vodních tocích a k poklesu hladiny podzemní vody. Hydrologické sucho se může vyskytovat s delším časovým odstupem i po odeznění meteorologického, případně i agronomického sucha (Tallaksen 2004).

Rychlost jeho nástupu je závislá na retenční kapacitě povodí, kterou odráží geomorfologické a půdní charakteristiky. V důsledku vyšších teplot se voda z podzemí vypařuje a následně infiltruje do vodního koryta, což vede ke snížení hladiny podzemních vod. Zároveň dochází ke snížení hladiny na vodních tocích, jenž je zapříčiněno v důsledku nedostatku srážek. Deficit povrchových vod se zpravidla vyvíjí kratší dobu, než je tomu u deficitu podzemních vod (Tallaksen 2004). V posledních dekáдах bývá často hydrologické sucho ovlivněno lidskou činností (Hladný 2009). V této práci jsou příčiny, průběh a následky hydrologického sucha zkoumány v povodí Loděnice.

Socioekonomické sucho je obvykle výsledkem všech již zmíněných typů sucha. Může však nastat v jakékoliv fázi sucha. Jedná se i situaci, kdy nedostatek vody, především pitné a užitkové, začne v negativním slova smyslu ovlivňovat potřeby společnosti a hospodářství. Projevuje se také pozastavením provozu vodních elektráren nebo velkými požáry (NDMC 2012). Socioekonomické sucho se značí nevyrovnaným poměrem mezi poptávkou a nabídkou vody.

Tallaksen (2004) ve své práci vyčlenila ještě *sucho ekologické*, kdy jsou nedostatkem vody ovlivněny ekosystémy, živočichové a rostliny.

4.3 Příčiny sucha

Sucho je komplexní jev, který je výsledkem působení několika faktorů. Hlavní příčinou sucha je meteorologická anomálie v globální cirkulaci a oceánských proudech. Jedná se o situaci, kdy se mění chod sezónních jevů nebo poloha cyklon a anticyklon (Estrela 2001). Na tyto primární příčiny poté navazují činitelé, jako například nedostatek srážek, vysoká evapotranspirace či teplota. Dalším ovlivňujícím faktorem mohou být lokální podmínky, mezi které můžeme řadit nadmořskou výšku, kontinentalitu podnebí, horskou bariéru a mnoho dalších faktorů. Sucho není výsledkem jen přírodních faktorů. Velký vliv na vznik sucha má i lidská činnost, která se v poslední době neustále stupňuje (Tallaksen 2004, Estrela 2001).

4.3.1 Fyzickogeografické faktory

Základním činitelem a hlavní příčinou sucha je nedostatek atmosférických srážek, který lze dobře pozorovat z dlouhých časových řad úhrnu srážek. Nejedná se pouze o množství spadlých srážek, nýbrž i o jejich načasování, polohu a intenzitu. Sucho nastává v době, kdy srážky jsou menší než evapotranspirace. Absence srážek ovlivňuje

hydrologický cyklus, tedy množství podzemní vody a vody v řekách a půdě (Estrela 2001).

Dalším výrazným faktorem ovlivňující vznik sucha je evapotranspirace. Jde o celkový výpar ze zemského povrchu, který se skládá z evaporace, což je výpar z půdy, a z transpirace, tedy výparu z rostlin (Novický 2009). Intenzitu evapotranspirace ovlivňuje teplota vzduchu, vegetační pokryv, relativní vlhkost vzduchu, rychlost větru, počet hodin slunečního svitu a oblačnost. Významnou roli při procesu evapotranspirace hraje schopnost retence vody v půdě (Tallaksen 2004).

Přírozená kapacita povodí je dalším neméně důležitým faktorem, který hraje roli při vzniku sucha. Významnou roli hraje například skupenství, ve kterém je voda v povodí zadržována, dále také záleží na hydrogeologických vlastnostech, které pomáhají udržet vodu. Povodí s podobným geologickým podložím reaguje na sucho stejně. Mokřady, bažiny a jezera pomáhají zadržovat vodu a chrání tak povodí před vznikem sucha. Naopak méně chráněná povodí, která okamžitě reagují na nedostatek srážek, se značí mělkými zvodněmi a hustou sítí vodních toků (Estrela 2001).

4.3.2 Antropogenní faktory

V dnešním světě neexistují takřka žádná povodí bez vlivu antropogenní činnosti. Se zvyšující životní úrovní společnosti si lidé kladou stále větší a větší nároky na spotřebu a odběry vody (Estrela 2001). Vznik sucha může podmiňovat nadměrná spotřeba vody pro domácnosti, zemědělství či průmysl. Problémem je nerovnoměrná plošná distribuce, která často neodpovídá spotřebě vody pro lidskou společnost. Ta se nejvíce vyskytuje ve velkých průmyslových oblastech a v oblastech intenzivního zavlažování. Problémem jsou odběry vod prováděné z podzemních vod. Při nichž může dojít k přerušení kontaktu mezi hladinou podzemní vody a vodním řečištěm (Tallaksen 2004).

Velký vliv na sucho má právě změna využití krajiny neboli landuse, která si v posledních desítkách let prošla velkou řadou změn. Výrazným způsobem ovlivňuje krajinný ráz výstavba urbanizovaných ploch. Zastavěné nepropustné povrchy zabraňují infiltraci, čímž vzrůstá povrchový odtok a jeho rychlost a snižuje se evapotranspirace. Při vydatných deštích je voda vedena pomocí struh rovnou do vodních toků, což následně vede ke změně odtokového režimu (Brázdil a kol. 2015). Lesy, převážně listnaté, spotřebují více vody než ostatní vegetační pokryvy. Zároveň však jsou schopny zadržovat více vody a nejsou tolik náchylné na extrémní sucha. Odstraněním vegetace se snižuje

retenční schopnost půdy a krajina je tak více náchylná k hydrologickému suchu (Tallaksen 2004).

Mezi významné ovlivnění lidskou činností patří úprava vodních koryt a výstavba přehradních nádrží. Stavba přehrady mění celkový ráz krajiny a ovlivňuje odtok. V klimatických oblastech, kde není nouze o množství srážek, se přehrady plní každý rok a zachovává se tedy průtok pod hrází. Oproti tomu v aridních oblastech, kde se přehrady naplňují jen zřídka, je potřeba zadržet vodu, která je nezbytná pro odtok v období sucha. Přehrady mohou mít jak pozitivní, tak negativní vliv. Mohou zadržovat vodu, která je z nich čerpána mimo povodí, což způsobuje deficit vody pod přehradou. Zároveň, pokud je voda v přehradách zadržována pro období sucha, mohou být zachovány normální průtoky i během tohoto období (Tallaksen 2004).

4.3.3 Vliv odtokového režimu

Odtokový režim ve značné míře ovlivňuje povrchové a podpovrchové vody, které jsou součástí hydrologického cyklu a jsou tak ve vzájemné interakci. Při absenci srážek se sníží hladina podzemních vod, což vede k menší dotaci pramenů a toků, která se projeví i v povrchovém toku. Silný vliv na průběh sucha mají vlastnosti povodí, jimiž jsou například půdní druhy, geologické podloží či tvar říční sítě. Odtok je masa vody, která odteče z určitého území za nějaký čas. Skládá se ze tří částí, a to z povrchového odtoku, hypodermálního a bazálního neboli základního. Povrchový odtok závisí na sklonu a délce svahu a na vegetačním pokryvu. Značnou měrou ovlivňuje množství vody infiltrované do půdy (Tallaksen 2004). Při vyšším úhrnu srážek stoupá podíl povrchového a hypodermického odtoku. V opačném případě, tedy při absenci srážek, roste podíl základního odtoku.

Povodí, ve kterých je rychlejší odtokový proces, jsou náchylnější ke vzniku sucha a povodní. Výskyt těchto hydrologických extrémů v povodí s rychlejším odtokovým procesem je poměrně častý, za to ale jejich délka není dlouhá. Jedná se o povodí s vysokým podílem povrchového a hypodermického odtoku, která nemají vyvinutý systém podzemních vod. Oproti tomu v povodích s převažujícím základním (bazálním) odtokem se výskyt sucha projevuje s delší časovou prodlevou, jelikož vlivem silné nenasycené vrstvy nejsou povodí schopna rychle zareagovat na změnu úhrnu srážek. Sucha v těchto povodích nejsou tak častá (Tallaksen 2004).

4.4 Ukazatele sucha

Sucho je velmi složitý jev. Pro jeho určení je potřeba ho velmi zjednodušit. V kapitole 4.1 je uvedeno, že neexistuje žádná obecná definice sucha, proto je velice obtížné vůbec rozhodnout, zdali se sucho vyskytuje či nikoliv. Dalším problémem je stanovení jeho počátku a konce, protože sucho má pomalý nástup i pozvolné ukončení. Obecně lze říci, že vyhodnocování sucha závisí na jeho charakteristikách. Ty se dělí na časové a prostorové. Mezi časové charakteristiky zahrnujeme zejména začátek, konec a délku trvání. Dalšími faktory podílejícími se na charakteru sucha jsou například vysoká teplota, rychlost a směr větru či relativní vlhkost vzduchu. Do prostorových charakteristik řadíme plošný rozsah sucha (Trnka 2010). Pro vyhodnocování sucha a jeho parametrů slouží tzv. indexy sucha. Při výpočtech těchto indexů sucha se přihlíží k různým faktorům. Mezi ně patří atmosférické srážky, teplota, půdní vláha, evapotranspirace, odtok, voda v řekách a nádržích nebo zásoby sněhu. Výpočet jednotlivých indexů závisí na požadovaných typech sucha.

4.4.1 Indexy hydrologického sucha

Sucho je nedílnou součástí hydrologického cyklu, které začíná v důsledku nedostatku atmosférických srážek. V kapitole 4.1 je uvedeno několik rozdílných definic. Na základě těchto definic existuje velká řada odlišných metod, které hodnotí sucho. Hydrologické sucho je nejčastěji hodnoceno na základě vodních stavů nebo naměřených průtoků. Důležitými faktory jsou ovšem i hydrogeologické charakteristiky území, daný vegetační pokryv nebo klimatické podmínky (Brázdil a kol. 2015). Kritériem pro určení hydrologického sucha může být například průtok, který dosahuje nižších hodnot než dlouhodobý měsíční průtok v daném měsíci (Novický a kol. 2009). Tallaksen (2004) ve své studii při hodnocení deficitu povrchových vod používala překročení M–denních průtoků a roční minima z dlouhodobých řad měření.

Novický a kol. (2009) uvádějí, že hydrologické sucho začíná v době, kdy:

- průměrný průtok je menší než příslušný dlouholetý průměrný měsíční průtok v daném měsíci (Vorel 1937);
- vyskytnou se alespoň tři měsíce, ve kterých je měsíční průtok menší nebo roven 60 % dlouhodobého průtoky daného měsíce (Johanovský 1985);
- vyskytne se nejnižší průměrný denní průtok v daném roce, tj. každý rok se objevuje jedno sucho (Gumbel 1963);

- alespoň v pěti po sobě jdoucích dnech se vyskytne průtok Q_{355} , tj. s pravděpodobností překročení 97,19 % (Řiřicová a kol. 2003). Hladný (2009) ve své knize udává místo pěti pouze tři po sobě následující dny s Q_{355} . Hodnota Q_{355} je všeobecně považována za hranici odběru vody bez technických obtíží, respektive za hranici tzv. ekologického průtoku.

V této práci jsou indexy hydrologického sucha založeny na vodoměrných pozorováních. Rozděleny dle míry komplexity charakterizace jevu na indexy prosté a komplexní. První skupina indexů vyjadřuje vztah mezi pozorovanými hodnotami sledované veličiny (například průtok) a jejím dlouhodobým normálem (Brázdil a kol. 2015). Komplexní indexy kombinují více pozorovaných a odvozovaných veličin a jsou vyvíjeny s ohledem na postižení celého procesu vodní bilance v povodí. Brázdil a kol. (2015) uvádí, že komplexní indexy obsahují odhad vlhkosti půdy na základě bilanční rovnice a její porovnání s dlouhodobou normální hodnotou vlhkosti pro vybrané časové území nebo s prahovou hodnotou stanovenou empiricky. Mezi tyto indexy se řadí například Palmerův index hydrologického sucha (Palmer Hydrological Drought Index – PHDI), index vlhkosti rostlin (Crop Moisture Index – CMI), agregovaný index sucha (Aggregate Drought Index – ADI) nebo index odezvy vegetačního sucha (Vegetation Drought Response Index – VegDRI).

Prvních pět prostých indexů (od metody dle WMO po Standardizovaný index sucha) je založeno na pozorování odtoku, zbylé dva prosté indexy (SWI a GRI) na sledování zásob podzemní vody. Komplexní indexy si představíme tři (výše zmíněný Palmerův index hydrologického sucha, index dodávek povrchové vody – SWSI a index náhrad sucha – RDI). Indexy SWSI a RDI zahrnují i hodnocení dalších složek vodní bilance, čímž může být třeba zásoba vody ve sněhu nebo v nádržích.

Metoda stanovení sucha podle Světové meteorologické organizace (WMO)

Metoda Světové meteorologické organizace (WMO) definuje nízký průtok jako průtok ve vodním toku během období dlouhotrvajícího suchého počasí. Brázdil a kol. (2015) uvádí, že tato definice může být velmi zavádějící, neboť k nízkým průtokům dochází i v jiných obdobích roku. Metoda podle WMO definuje nedostatek vody jako výrazný, přičemž průměrný roční průtok je menší než normál o alespoň jednu směrodatnou odchylku, nepřetržitý, jestliže průměrný roční průtok je menší než normál alespoň čtyři roky za sebou, a rozsáhlý v případě, že výrazný nebo nepřetržitý nedostatek

vody postihuje celý uvažovaný region. Brázdil a kol. (2015) dále uvádí, že mnoho autorů hovoří o období nízkých průtoků trvajících déle než rok jako o ročním suchu.

Metoda prahové hodnoty (nedostatkových objemů)

Pomocí metody prahové hodnoty bývá nejčastěji definováno období hydrologického sucha. Tato metoda je formulována pomocí limitní hodnoty průtoku, pod kterou odtok probíhá v režimu sucha. Suchá perioda začíná, poklesne-li průtok pod zvolenou limitní hodnotu. Toto období zároveň končí při zvětšení průtoku nad prahovou úroveň nebo při doplnění nedostatkového objemu během zvýšených nadlimitních průtoků. Základními charakteristikami takto definovaného hydrologického sucha jsou velikost (nedostatkový objem), jeho délka působení a intenzita. Problémem je, že nedostatkové objemy v různých povodích nelze vzájemně porovnávat v absolutních hodnotách. Nutná je tedy jejich standardizace, při které se objem dělí daným limitním průtokem. Podle způsobu časového kroku výsledky nedostatkového objemu vychází buď jako bezrozměrná čísla nebo v jednotkách času. Standardizovaný nedostatkový objem $NDVI_t$ je možný určit ze vztahu:

$$NDVI_t = \begin{cases} NDVI_{t-1} + (Q_{lim} - Q_t / Q_{lim}) \Delta t, & \text{jestliže } Q_t < Q_{lim}, \end{cases}$$

kde Q_{lim} je zvolený prahový průtok, Q_t je průtok v časovém kroku t ($Q_t < Q_{lim}$) a Δt je časový interval (Brázdil a kol. 2015). Důležitým krokem je stanovení onoho prahového průtoku, který může být jak konstantní, tak proměnlivý během roku. Za účelem určení sucha poklesem průtoku pod danou hodnotu průtoku, například ekologicky podmíněnou, se používá pevná hodnota prahového limitu. Oproti tomu je-li účelem definice sucha odchylka od normálu, je vhodnější proměnlivý limit, což může být mnohdy zavádějící, protože suchá perioda zde může připadnout i na období zvýšené vodnosti. V tomto případě je lepší spíše než sucho použít pojem nedostatek odtoku. Mnozí autoři se snaží tento index vylepšit, například přesněji definovat období suchých period, které může být často mylné.

Index regionálního nedostatku odtoku

Jde o poměrně nový index, který ve své práci zavedla Stahl (2001). Index regionálního nedostatku odtoku (Regional Streamflow Deficiency Index – RSDI) slouží k definování regionálního sucha, kdy výchozími daty jsou jednotlivé časové řady

z vodoměrných stanic. Pro stanovení velikosti sucha v daném regionu je určující podíl povodí postižených nedostatkem odtoku. V rámci celého regionu jsou poté vzájemně porovnávány indexy nedostatku vody DI v řadách odtoku jednotlivých vodoměrných stanic.

Samotný výpočet indexu probíhá ve dvou krocích. Nejprve se formuluje sucho na jednotlivých měrných stanicích pomocí metody prahové hodnoty s použitím limitní hodnoty Q_{90} . V případě, že průtok poklesne pod hodnotu Q_{90} je index DI pro každý profil určen hodnotou 1. V ostatních případech je definován hodnotou 0. Ve druhé fázi jsou naměřené výsledky z jednotlivých stanic v regionu vzájemně porovnávány. Region je ve studii Stahlové (2001) brán jako celé území státu. V případě, že vodoměrné stanice vykazují stejný průběh sucha, je takový případ označován jako regionální sucho. Jedná se v podstatě o výpočet prostorového průměru indexu DI a výsledný index RSDI je tedy brán jako podíl povodí postižený nedostatkem vody:

$$RSDI_c(t) = \binom{1}{n} \sum_{G=1}^n D_G(t),$$

kde C je shluk stanic v regionu, G je příslušná vodoměrná stanice, n je počet vodoměrných stanic a D je vypočteno na základě prvního již zmíněného kroku. Metoda byla použita ke studiu trvání a trendů v řadách historických epizod sucha na celém území Evropy či na území Francie. I proto se mnozí autoři snaží tento index dále vyvíjet a lépe definovat (Niemeyer 2008, Hisdal a kol. 2001).

Odtokový index sucha (SDI)

SDI (Streamflow Drought Index) je index, který formuluje sucho v měsíčním kroku z hodnot odtoku $Q_{i,j}$, kde i značí hydrologický rok a j příslušný měsíc. Tento index poprvé ve své práci použili autoři Nalbantis a Tsakiris v roce 2009. Výpočet je stanoven jako:

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j}$$

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{\sigma_k},$$

kde $V_{i,k}$ je kumulativní objem odtoku pro i -tý hydrologický rok a k -té referenční období, $Q_{i,j}$ je hodnota měsíčního odtoku, \bar{V}_k je průměr a σ_k je směrodatná odchylka

kumulativního objemu pro k -té referenční období. Hodnoty i jsou tedy $i = 1, 2, \dots$, hodnoty $j = 1, 2, \dots$ a hodnoty $k = 1, 2, 3, 4$ (Nalbantis, Tsakiris 2009). Podle hodnot indexu SDI se následně určují čtyři třídy pravděpodobnosti výskytu sucha (Brázdil a kol. 2015):

- mírné sucho $\langle -1; 0 \rangle$;
- střední sucho $\langle -1,5; -1 \rangle$;
- závažné sucho $\langle -2; -1,5 \rangle$;
- extrémní sucho < -2 .

Standardizovaný index odtoku

Standardized Runoff Index (SRI) je jedním z nejpoužívanějších indexů při měření hydrologického sucha. SRI je v podstatě obdobou SPI (Standardized Precipitation Index), který byl poprvé použit McKeem (1993) jako metoda pro určování meteorologického sucha. Standardizovaný index odtoku nepracuje se srážkami, nýbrž s řadami průtoků a používá se pro roční nebo měsíční časový krok (Shukla, Wood 2008). Jeho podstata je založena na statistické transformaci dat na normální rozdělení. Výpočet indexu probíhá ve dvou krocích. V první fázi je třeba zjistit kumulativní distribuční funkci pomocí které se proloží řadu průtoků. Následně jsou kumulativní pravděpodobnosti standardizovány převedením na Z -rozdělení. SRI nabývá s 95 % pravděpodobností hodnot od $-1,96$ až po $1,96$. Stav sucha se stanoví podle kvantilového rozpětí hodnot indexu. Sucho se obvykle stanovuje při hodnotách menších než 5. percentil, extrémní sucho jako výskyt hodnot menších (-2) . Mírné sucho je definováno 5. – 30. percentilem a hodnotou Z v rozmezí $-0,5244$ až $-1,6448$ (pravděpodobnost výskytu 25 %) (McKee a kol. 1993, Brázdil a kol. 2015, Shukla, Wood 2008)

Standardizovaný index úrovně hladiny

SWI (Standardized Water Level Index) slouží především k vyhodnocování stavu podzemních vod. Index byl vyvinut za účelem pozorování nedostatku zásob v podzemních vodách. Je definován vztahem:

$$SWI = (W_{ij} - W_{im}) / \sigma,$$

kde W_{ij} je úroveň podzemní vody v i -tém vrtu a j -tém pozorování, W_{im} je dlouhodobý sezonní průměr a σ je směrodatná odchylka. Tento index hodnotí sucho na mírné (SWI = 0–1), střední (1–1,5), závažné (1,5–2) a extrémní (> 2) (Brázdil a kol. 2015).

Index zdrojů podzemní vody

Index zdrojů podzemní vody neboli Groundwater Resource Index (GRI) také pracuje s hladinou podzemních vod. Byl sestaven za účelem identifikace poklesu zásob podzemní vody. S tímto indexem se pracuje obzvláště v letních měsících a je výstižný pro krátkodobou či dlouhodobou předpověď výskytu sucha na daném území. GRI je dán vztahem:

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}},$$

kde D je míra zadržení podzemní vody v roce y a v měsíci m , μ je střední hodnota a σ směrodatná odchylka zadržení podzemní vody v měsíci m pro definovaný počet let (Brázdil a kol. 2015)

Palmerův index hydrologického sucha

Jedná se o obdobu Palmérova indexu závažnosti sucha (Palmer Drought Severity index – PDSI), který však pracuje s atmosférickými srážkami a pomocí něho se tedy stanovuje meteorologické sucho. Palmerův index hydrologického sucha (PHDI) má podobný průběh a velikost jako index PDSI. Při výpočtu obou indexů se však předpokládá, že hydrologické sucho začíná o něco později než meteorologické a zároveň končí o něco později. PHDI zohledňuje dlouhodobější sucho, které ovlivňuje zásoby vod v říčních korytech či v podzemních vodách (Palmer 1965). Pomocí indexu dokážeme zhruba vypočítat počátek a konec sucha na základě srážek. Existují čtyři kategorie sucha – téměř normální (vyskytuje se přibližně 28 – 50 % času), mírné až středně závažné (zhruba 11 – 27 % času), závažné (vyskytuje se 5 – 10 % času) a extrémní, které se vyskytuje kolem 4 % času (Alley, M. W. 1984).

Index dodávek povrchové vody

Index dodávek povrchové vody (Surface Water Supply Index – SWSI) poskytuje informaci o zadržené povrchové vodě v celém povodí (Shafer, Dezman 1982). Oproti výše zmiňovanému indexu PHDI do výpočtu tohoto indexu vstupuje také akumulace vody ve sněhové pokrývce a v nádržích. Zaměřuje se na oblasti, ve kterých je hlavním

zdrojem vodnosti tání sněhové pokrývky. Pro výpočet indexu se používají veličiny zastupující množství sněhu a dešťových srážek, celkový odtok a zásoby vody v nádržích. Každá zastoupená složka v povodí je měsíčně vážena podle toho, jakou měrou přispívá k zásobám povrchové vody v daném povodí. Je definován vztahem:

$$SWSI = \frac{aP_{snow} + bP_{prec} + cP_{stream} + dP_{resv} - 50}{12},$$

kde a , b , c , d jsou váhy pro sněhové (*snow*) a dešťové (*prec*) srážky, odtok (*stream*) a zásobu vody v nádržích (*resv*) ($a + b + c + d = 1$), a P je pravděpodobnost (udávaná v %) nedosažení jednotlivých bilančních složek. Index pracuje ve dvou režimech. V zimním režimu se aplikuje zásoba vody ve sněhu, srážky a zásoba vody v nádržích. Oproti tomu v letním režimu je sněhová zásoba nahrazena celkovým odtokem z povodí. Stavy sucha dle indexu SWSI se pohybují v intervalu od -4 až 4 . Velkou výhodou je, že pomocí indexu dokážeme porovnávat zásoby vody v daném povodí (Brázdil a kol. 2015).

Index náhrad sucha

Třetí komplexní index, který je v této práci představen, se jmenuje index náhrad sucha neboli Reclamation Drought Index (RDI). Tento index poprvé se své práci použil americký vědec K. Weghorts v roce 1996 za účelem poskytování náhrad pro ty, kteří byli suchem zasaženi a přesáhly určitou úroveň. Zároveň jsou k obecné detekci sucha. Index pracuje s poptávkou a nabídkou. Vstupními faktory je teplota vzduchu na jedné straně a srážkový úhrn, zásoba vody v nádržích, celkový odtok a zásoby vody ve sněhové pokrývce na druhé straně. Index je zaměřen na dobu trvání sucha. Ve výsledku index RDI reaguje pomaleji než výše zmíněný Palmerův index hydrologického sucha PHDI (Brázdil a kol. 2015).

4.5 Dopady sucha

Již od pradávna byla voda základní podmínkou pro život a její nedostatek má celou řadu negativních dopadů na přírodní krajinu a společnost. V moderní době je z důvodu rostoucí populace, extenzivního zavlažování a užívání vody pro průmysl společnost ve vztahu k suchu mnohem zranitelnější, než to tomu bylo dříve. Během působení sucha roste poptávka po vodě navzdory jejímu nedostatečnému množství. V tomto období proto musí být šetrně regulován výdej a neúměrné zacházení s vodou. Dopady sucha však nemusí postihnout pouze dané povodí ani stát, nýbrž může mít globální následky, například do socioekonomické. Rovněž může způsobit dlouhodobé

změny kdykoliv a kdekoliv po světě. Oproti povodním se sucho vyvíjí bez extrémních projevů a jeho postup je pomalý. Ve vyspělém světě si státy mohou dovolit řešit problém sucha například pomocí vodních přivaděčů, které dokáží sucho alespoň zmírnit. V chudých rozvojových zemích je tento problém skoro neřešitelný (Hladný 2009, Šachová 2013). Proto je nutné problematiku sucha řadit k velkým hrozbám a nelze ji jen tak opomíjet. Sucho oproti povodním může mít dopad na mnohem větší plochu (Novický a kol. 2009). V mé práci jsem vyčlenil tři možné dopady sucha (environmentální, ekonomické a sociální). Dopady environmentální se začnou projevovat jako první, například v zemědělství, lesnictví či v přírodních ekosystémech. Následkem environmentálních vznikají dopady ekonomické. V návaznosti na tyto dva dopady sucha přichází postupně sociální dopady, které závisí především na vyspělosti jednotlivých států. Sociální dopady jsou velmi často finálním vyústěním všech předchozích a často mohou vést až ke katastrofickým následkům.

4.5.1 Environmentální dopady

Obecně dopady na životní prostředí jsou v současné době považovány za velmi nebezpečné. Hlavním předpokladem pro růst rostlin je dostatek vody. Při srážkovém deficitu klesá obsah vody v půdě, což se začíná negativně projevovat úhynem rostlin. Zemědělství, které je závislé na zavlažování, je mnohem zranitelnější, obzvlášť pokud sucho doprovází vysoké teploty a s nimi spojen větší výpar (Hladný 2009). Environmentální dopady mají nejvýraznější projevy v přírodních ekosystémech. Při dlouhotrvajícím suchu hyne mnoho druhů rostlin, což může v některých případech vést až k úplnému zániku některých stanovišť. Nedostatek srážek zapříčiňuje pokles průtoků, respektive úplné vysychání vodních toků, což má za následek snižování biodiverzity a rázu krajiny. Poklesem hladiny podzemních vod jsou ohroženy vodní ekosystémy, protože dochází ke znečišťování říčních koryt vlivem větší koncentrace škodlivin a zvyšující se teploty vody (Vlnas a kol. 2015). Dochází také k vysychání půdy, což má za následek větší prašnost a může docházet dokonce k prachovým bouřím (Tallaksen 2004, Novický a kol. 2009). V lesnictví se sucho projevuje zhoršeným stavem dřevin a počtem druhů. Zvyšuje se úmrtnost lesních porostů, dochází tedy k úbytku lesů a menší produkci. Při kombinaci dlouhotrvajícího sucha a vyšších teplot může docházet ke vzniku lesních požárů (Brázdil a kol. 2015, NDMC 2012).

4.5.2 Ekonomické dopady

Ekonomické dopady vycházejí z environmentálních, a to zejména v sektorech, které navazují na zemědělství, protože tam jsou ekonomické ztráty nejvíce citelné. Vlivem nedostatku srážek půda nemá vláhu potřebnou pro rostliny a ty jsou následně méně úrodné. Tím klesá úroda, výnosnost pastvin a produkce mléka. Dobytek tak ztrácí své krmivo a velmi často dochází k úhynům či vybíjení stád (Novický a kol. 2009). V případě nedostatečného množství vodních zdrojů má sucho dopad i na hospodářství. Sucho ovlivňuje zároveň energetiku, která je při deficitu vody omezena, případně úplně zastavena, což se projevuje například ve vodních elektrárnách. Voda je potřebná i pro chlazení průmyslových a energetických zařízení, tedy pro tepelné a jaderné elektrárny. Při deficitu vody se mohou začít přehřívat, což může mít za následek poškození výrobních technologií. Dopady sucha se mohou projevovat i v rybářství, zejména úhynem ryb v rybnících. V těchto případech rybník nemá stálý přítok, tudíž nedochází k mísení a okysličování vody. V důsledku nedostatku vody a při vysokých teplotách dochází ke snižování kvality vody, v níž některé druhy ryb nedokáží žít a hynou. Ekonomické dopady zapříčiňují velké ekonomické ztráty, zejména kvůli pojistným událostem a velkému riziku investovat. Velké finanční prostředky bývají zároveň vynaloženy k zajištění zdrojů pitné vody do nejvíce postižených regionů (Brázdil a kol. 2015, Šachová 2013)

4.5.3 Sociální dopady

Lidé ke svému životu potřebují vodu, nejvíce jsou závislí na příjmu pitné vody. V některých rozvojových zemích jsou lidé závislí na vodě užitkové, jejíž kvalita se ovšem v době sucha mnohonásobně zhoršuje a populace ji tak nemůže využívat. Jak bylo zmíněno výše, v důsledku nedostatečně rozvinuté infrastruktury, která by pomáhala zásobovat společnost v rozvojových zemích, postihuje sucho v první řadě právě tyto chudé země (Hladný 2009). V těchto zemích v důsledku používání závadné vody propukají nejrůznější druhy infekcí, což může vést až k nejrůznějším scénářům (Šachová 2013). Závadná voda vzniká v důsledku vysokých teplot při změně v chemickém složení, kdy je ve vodě méně rozpuštěného kyslíku, což vede ke vzniku různorodých druhů bakterií a řas. Další příčinou vzniku závadné vody je fakt, že voda tak nemá šanci se ředit s větším objemem při nižších vodních stavech. Ve znečištěné vodě je velké množství rozpuštěných škodlivých látek a vodu tak nelze jako pitnou používat. Při

nedostatku pitné vody v daném regionu je potřeba zajistit její dodávky, což v rozvojových zemích znamená velké finanční investice (Brázdil a kol. 2015).

5. ANALÝZA PROJEVŮ HYDROLOGICKÉHO SUCHA V POVODÍ LODĚNICE

5.1 Metodika

5.1.1 Datové zdroje

Pro analýzu hydrologického sucha v povodí Loděnice byla použita data z limnigrafické stanice Loděnice (ID 198400, č. p. 207), která je spravována Českým hydrometeorologickým ústavem. Tato stanice se nachází ve stejnojmenné obci Loděnice pod dálnicí D5. Data byla poskytnuta výše zmíněným ústavem ve formě průměrných denních průtoků od hydrologického roku 1977 do roku 2018. V datové řadě chybí data z let 1980, 1981 a 1982. Poděkování za jejich rychlé zprostředkování patří školiteli a paní Heleně Příbylové.

5.1.2 Použité metody

Pro analýzu hydrologického režimu byly nejprve vypočteny základní odtokové charakteristiky vybraného povodí. Ze získaných průměrných denních průtoků byla v programu MS Excel zpracována další průtoková data. Jednalo se převážně o výpočty průměrných měsíčních a ročních průtoků, které byly následně graficky znázorněny. Pomocí průměrných denních a průměrných měsíčních hodnot byla posouzena variabilita odtoku v průběhu celého roku. Průměrné roční průtoky zobrazují změnu vodnosti toku v pozorovaném období. Na základě těchto datových řad bylo v programu MS Excel vyhodnoceno hydrologické sucho pomocí počtu suchých dní a jejich časového rozdělení. Druhá část analýzy hydrologického sucha byla provedena pomocí metody nedostatkových objemů.

5.1.2.1 Metoda prahové hodnoty

Nejpoužívanější metodou pro určování hydrologického sucha je metoda prahové (mezní) hodnoty, která spočívá v definování prahové hodnoty Q_x . Pro tuto práci byla vybrána hodnota průtoků Q_{355} , která je v Česku používána nejčastěji. Prahová hodnota může být buď fixně dána po celý rok nebo může být vypočítána pro každý den nebo měsíc. Pro účely této práce však postačí již zmíněná stálá limitní hodnota průtoků Q_{355} . Pomocí ní byly vypočteny dny v hydrologickém roce, kdy jejich průtok poklesl pod zvolenou mezní hodnotu. Tyto dny byly následně označeny jako hydrologicky suché.

Tallaksen a kol. (2004) ve své práci zmiňují, že metoda má několik problémů. Nejzásadnějším jsou poklesy průtoku pod limitní hodnotu Q_x , které však trvají pouze krátkou dobu. V zásadě se jedná o obvyklý projev rozkolísanosti průtoku. Tallaksen a kol. (2004) uvádějí, že důležitým krokem pro správné zhodnocení hydrologického sucha pomocí této metody je definování minimální doby, pod kterou se musí průtok držet pod zvolenou limitní hodnotou.

5.1.2.2 Metoda nedostatkových objemů

Na základě dat z limnigrafické stanice Loděnice byla pro určení hydrologického sucha zároveň použita metoda nedostatkových objemů spočívající ve vymezení doby, ve které je průtok menší než zvolený limitní průtok Q_{355} . Následně je dopočítán deficitní objem vody (v m^3) aktuálně naměřeného průtoku na zvolený limitní průtok. Tento nedostatkový objem je roven množství vody, které by bylo potřeba v době hydrologického sucha, aby bylo dosaženo zvoleného limitního průtoku (Treml 2011).

Hlavním cílem této práce je zhodnotit hydrologické sucho v posledních letech, a to, zda je sucho mírnější nebo stále prohlubující se. Vybrány byly poslední dva hydrologické roky, které bylo nutno podrobněji analyzovat. I tomto případě byly výstupem grafy vytvořené v programu MS Excel.

5.2 Odtokové poměry povodí

Součástí hydrologického cyklu je odtok z povodí, který je ovlivněn nejčastěji srážkami, evapotranspirací či uspořádáním říční sítě. Mezi hlavní zdroje vodnosti patří v Česku atmosférické srážky, sníh a podzemní voda. Každý vodní tok má svůj odtokový režim, který popisuje změny vodnosti během roku. Ty mohou být hodnoceny pomocí dlouhodobých, ročních, měsíčních a denních výkyvů vodních stavů či průtoků. Jednotlivé odtokové režimy řek jsou popsány na základě měrných jednotek odtoku, mezi které patří například průtok. Na základě průměrných průtoků měřených v m^3/s jsou data vyhodnocována a analyzována. Detailní rozbor odtokových poměrů nám poslouží k hledání příčin hydrologického sucha a jeho následného popisu v čase.

5.3 Variabilita denních průtoků

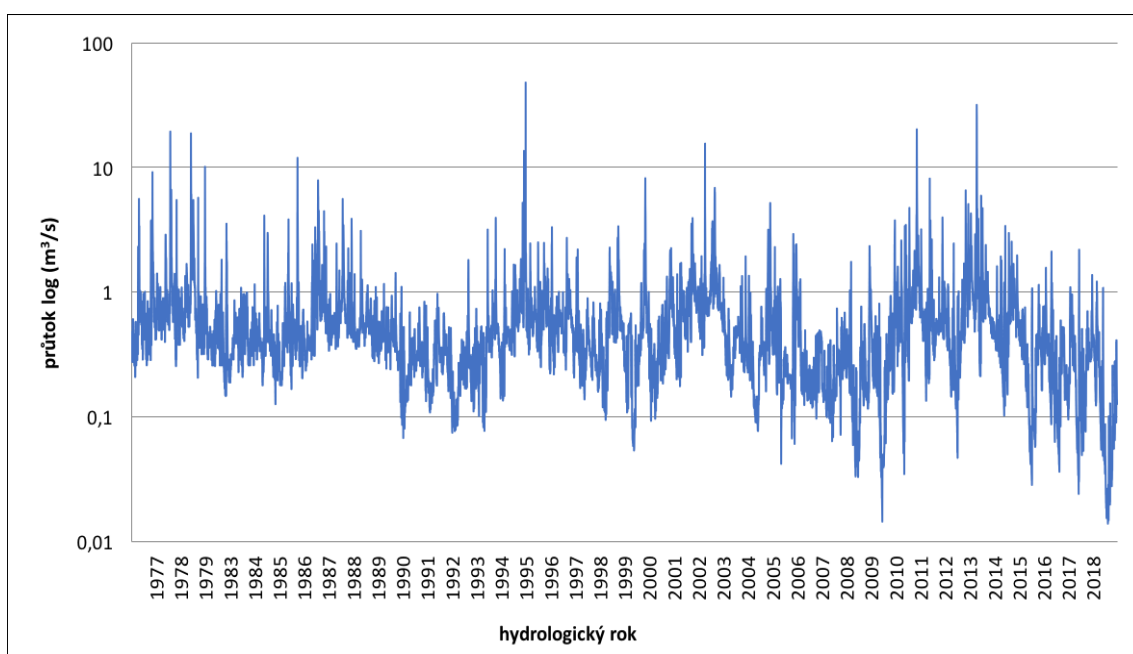
Variabilita denních průtoků byla analyzována na základě průměrných denních průtoků získaných z hlásného profilu č. 207 Loděnice od Českého hydrometeorologického ústavu. K dispozici jsou data od hydrologického roku 1977 až 2018, přičemž chybí roky 1980, 1981 a 1982. Z průměrných denních průtoků byly odvozeny hodnoty průměrných měsíčních a ročních průtoků. Na základě těchto průtoků byly vytvořeny grafy a tabulky charakterizující hydrologické sucho v povodí Loděnice.



Obrázek 10: Limnigrafická stanice Loděnice – 198400 (hlásný profil č. 207). Zdroj: vlastní fotografie.

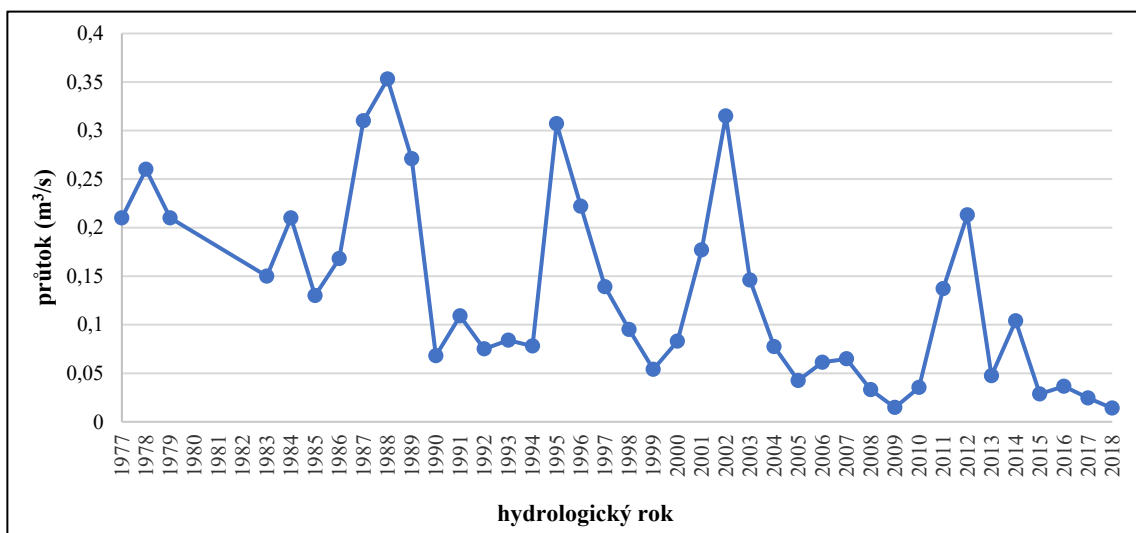
5.3.1 Průměrné denní průtoky

Dlouhodobý průměrný průtok Loděnice je roven hodnotě $0,640 \text{ m}^3/\text{s}$. Chod dlouhodobých průměrných denních průtoků za sledované období je znázorněn na grafu č. 1. Z něho byly odečteny extrémní hodnoty za celé pozorované období, jež jsou zobrazeny v tabulce č. 3. Absolutní minimum bylo dosaženo dne 20. 8. 2018, kdy byl v důsledku dlouhotrvajícího sucha naměřen průtok $0,014 \text{ m}^3/\text{s}$. Absolutní maximum bylo naopak naměřeno dne 26. 6. 1995, kdy průtok dosáhl hodnoty $47 \text{ m}^3/\text{s}$. Na první pohled je patrná vyšší rozkolísanost, která se začala projevovat počátkem 21. století. Povšimnout si zároveň můžeme klesajícího trendu průměrných denních průtoků v posledních pěti letech. Tento trend je zároveň zachycen na grafu č. 2, jenž zobrazuje chod ročních minim celého pozorovaného období.



Graf 1: Hydrogram znázorňující denní průtoky za celé sledované období (1977–2018).

Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Graf 2: Roční minima v pozorovaném období 1977–2018. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Tabulka 3: Extrémní hodnoty průměrných denních průtoků ve sledovaném období.

Den	Nejvyšší hodnoty (m³/s)	Den	Nejnižší hodnoty (m³/s)
26. 6. 1996	47	20. 8. 2018	0,014
2. 6. 2013	31,5	21.8. 2018	0,0142
3. 6. 2013	28,1	31. 8. 2009	0,0147

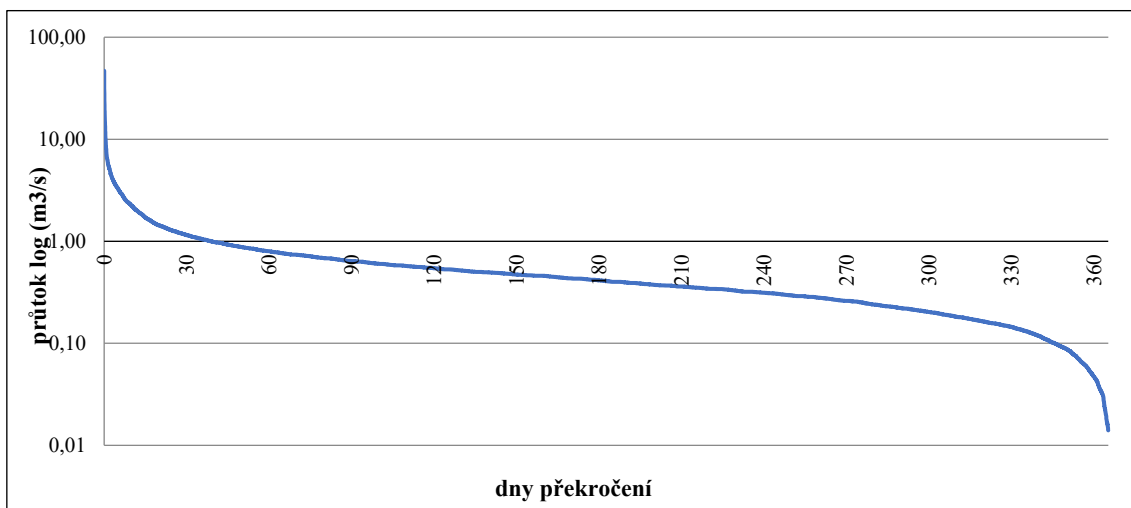
Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Dalším ukazatelem rozkolísanosti je čára překročení (graf č. 3), pomocí které dokážeme zjistit, kolik dní v roce je dosažen nebo překročen daný průtok. Z grafu je patrné, že odtokový režim Loděnice má vcelku vyrovnaný režim s krátkodobým zvýšením vodního stavu. Z křivky překročení byly následně odečteny hodnoty M–denních průtoků, které jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tabulka 4: Hodnoty M–denních průtoků pro profil Loděnice za celé pozorované období.

průtok	Q30	Q60	Q90	Q120	Q150	Q180	Q210	Q240	Q270	Q300	Q330	Q360
m³/s	1,15	0,80	0,64	0,55	0,47	0,41	0,36	0,31	0,26	0,20	0,15	0,07

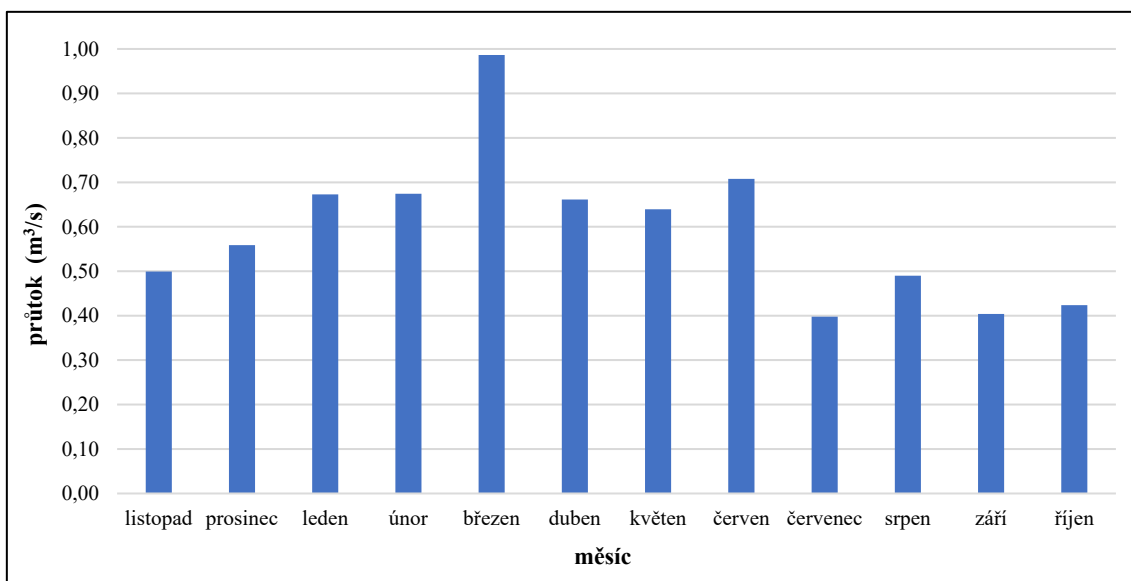
Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



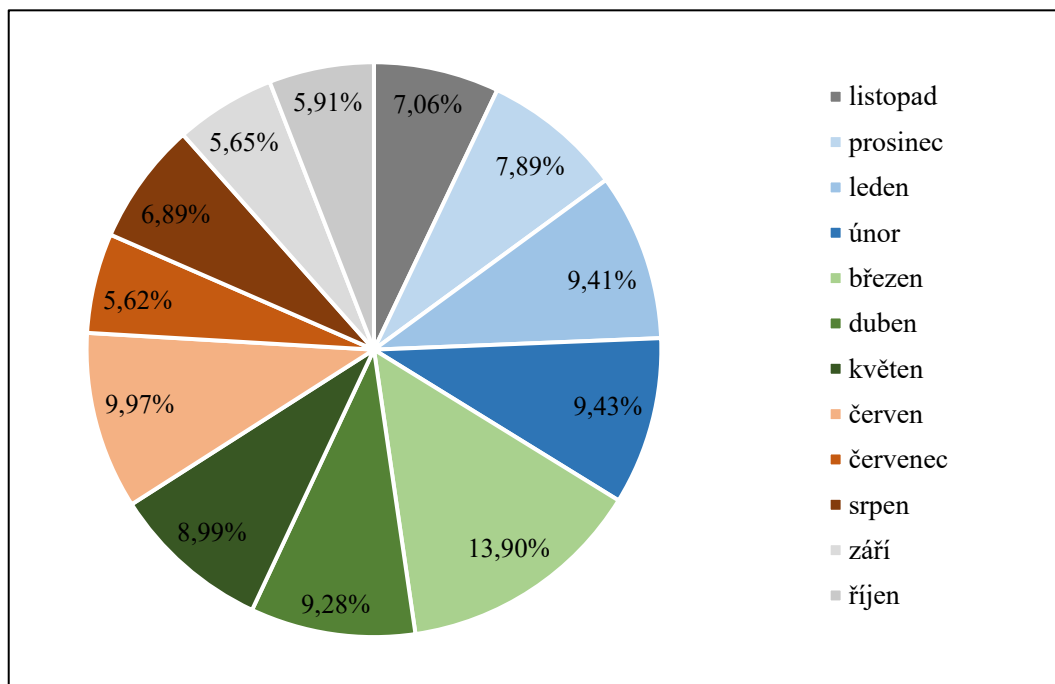
Graf 3: Křivka překročení M -denních průtoků za celé pozorované období. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

5.3.2 Průměrné měsíční průtoky

Na základě průměrných denních průtoků byly vypočteny průtoky měsíční, které jsou zobrazeny na grafu č. 4. Rozložení průtoků v průběhu celého roku je vcelku vyrovnané. Maxima je dlouhodobě dosahováno v období tání sněhu v březnu. Průměrný průtok v tomto měsíci dosahuje hodnoty $0,99 \text{ m}^3/\text{s}$, což odpovídá 13,90 % ročního odtoku (graf č. 5). Druhým nejvodnějším měsícem je červen, kdy je v důsledku dešťových srážek dlouhodobě dosahováno hodnoty kolem $0,71 \text{ m}^3/\text{s}$. Červen má podíl na ročním odtoku 9,97 %. Nejméně vodný měsíc je červenec s průměrným průtokem $0,40 \text{ m}^3/\text{s}$, což odpovídá 5,62 % ročního odtoku.

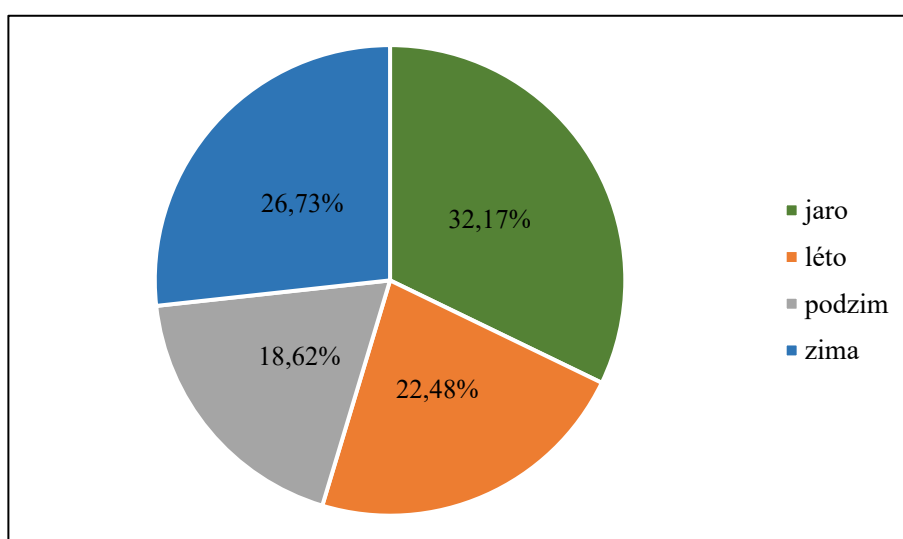


Graf 4: Dlouhodobé průměrné měsíční průtoky pro profil Loděnice (1977–2018). Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Graf 5: Podíl jednotlivých měsíců na ročním objemu odtoku pro profil Loděnice (1977–2018). Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

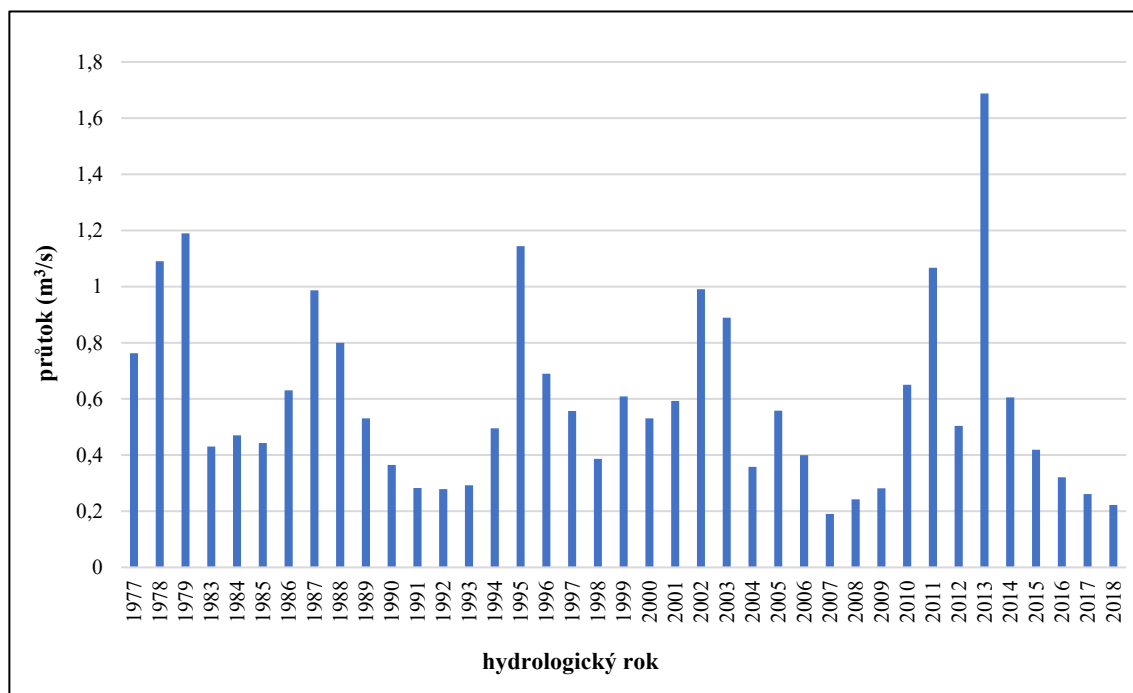
Na grafu č. 6 je vyhodnocen odtokový režim z hlediska ročních období. Z grafu je patrná značná variabilita odtoku v rámci celého roku. Nejvyšší podíl je obecně dosahován na jaře (32,17 %), kdy je zdrojem vodnosti tání sněhové pokrývky. Vysoký podíl vykazují i zimní měsíce, které se na ročním odtoku podílí 26,73 %. Naopak nejméně vodným ročním obdobím je podzim s 18,62 % z celkového ročního odtoku.



Graf 6: Podíl ročních období na ročním objemu odtoku pro profil Loděnice (1977–2018). Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

5.3.3 Průměrné roční průtoky

Na základě průměrných denních průtoků byly vypočteny průměrné roční průtoky. Pro zhodnocení variability odtoku byla pro celé sledované období stanovena hodnota dlouhodobého průměrného průtoku $0,640 \text{ m}^3/\text{s}$. Graf č. 7 zobrazuje průměrné roční průtoky za celé pozorované období. Absolutní minimum z hlediska průměrných ročních průtoků bylo v roce 2007, kdy hodnoty dosahovaly pouze $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$. Za celý rok oteklo v součtu pouze $69,44 \text{ m}^3/\text{s}$. Jako další mimořádně málo vodné můžeme označit roky 2018, 2008 a 2017. Oproti tomu absolutního maxima bylo dosaženo v roce 2013, kdy bylo celé povodí zasaženo povodněmi. V tomto roce se hodnota průměrného ročního průtoků vyšplhala téměř k $1,70 \text{ m}^3/\text{s}$. Mezi další vodné roky můžeme zařadit léta 1978, 1979, 1995 a 2010. Ve všech případech bylo docíleno hodnoty $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Povšimnout si zároveň lze klesající trendu v posledních letech. Od roku 2014 hodnoty průměrného ročního průtoků nepřesahují $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Pravděpodobnost překročení průměrných ročních průtoků je uvedena v tabulce č. 6.



Graf 7: Hydrogram znázorňující průměrné roční průtoky v jednotlivých letech na profilu Loděnice. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Tabulka 5: Roční odtok v nejvodnějších a nejsušších letech.

Rok	Nejvyšší hodnoty (m ³ /s)	Rok	Nejnižší hodnoty (m ³ /s)
2013	614,94	2007	69,44
1979	435,22	2018	81,04
1995	415,13	2008	88,71

Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Tabulka 6: Pravděpodobnost překročení průměrných ročních průtoků za celé sledované období.

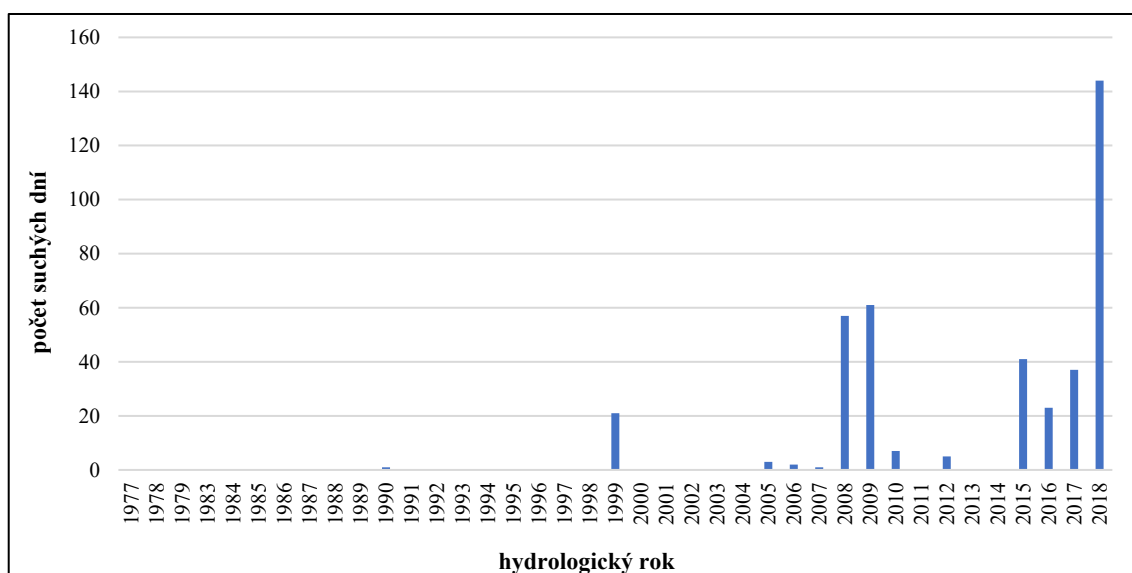
rok	Q _r (m ³ /s)	P _i (%)	vodnost	rok	Q _r (m ³ /s)	P _i (%)	vodnost
1977	0,76	24,62	V	2000	0,53	50,00	P
1978	1,09	9,39	MV	2001	0,59	39,85	V
1979	1,19	4,31	MV	2002	0,99	14,47	V
1983	0,43	62,69	S	2003	0,89	19,54	V
1984	0,47	57,61	P	2004	0,36	75,38	S
1985	0,44	60,15	P	2005	0,56	42,39	P
1986	0,63	32,23	V	2006	0,40	67,77	S
1987	0,99	17,01	V	2007	0,19	98,22	MS
1988	0,80	22,08	V	2008	0,24	93,15	MS
1989	0,53	47,46	P	2009	0,28	85,53	S
1990	0,36	72,84	S	2010	0,65	29,70	V
1991	0,28	82,99	S	2011	1,07	11,93	V
1992	0,28	88,07	S	2012	0,50	52,54	P
1993	0,29	80,46	S	2013	1,69	1,78	MV
1994	0,50	55,08	P	2014	0,61	37,31	V
1995	1,14	6,85	MV	2015	0,42	65,23	S
1996	0,69	27,16	V	2016	0,32	77,92	S
1997	0,56	44,92	P	2017	0,26	90,61	MS
1998	0,39	70,30	S	2018	0,22	95,69	MS
1999	0,61	34,77	V				

Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

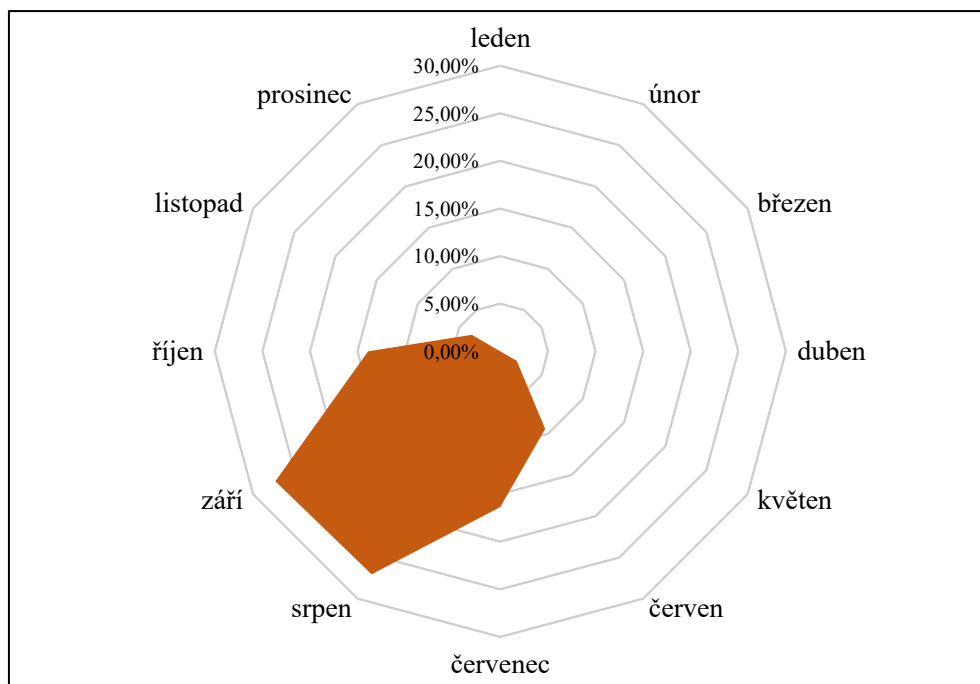
5.4 Hydrologické sucho na Loděnici

5.4.1 Hodnocení na základě suchých dní

Hydrologické sucho je v této práci vyhodnoceno na základě počtu dní s výskytem sucha. Tyto dny jsou stanoveny podle metody prahové hodnoty pro každý rok sledovaného období (graf č. 8). Suchý den je označen v případě, že průměrný denní průtok poklesne pod hodnotu minimálního průtoku Q_{355} , což je považováno za hranici hydrologického sucha. V případě Loděnice prahová hodnota průtoku Q_{355} je $0,068 \text{ m}^3/\text{s}$. Tudíž je-li průměrný denní průtok menší než $0,068 \text{ m}^3/\text{s}$ byl daný den označen jako suchý. Ve sledovaném období se pod prahovou hodnotou udávanou ČHMÚ vyskytlo 403 dní hydrologického sucha. Z grafu č. 8 je patrná vysoká nepravidelnost v rámci celého pozorovaného období. V první polovině sledovaného období byl zaznamenán pouze jeden suchý den v roce 1990. Oproti tomu ve druhé polovině období můžeme vyzorovat nárůst suchých dní v jednotlivých letech. Za zmínku stojí roky 1999, 2008 a 2009. V posledním případě v bylo zjištěno dokonce 61 dní hydrologického sucha. Na první pohled je zřejmý vysoký nárůst počtu suchých dní v posledních čtyřech letech. Za úplný extrém se dá považovat poslední analyzovaný rok 2018. Z 365 dní v roce bylo 144 hydrologicky suchých dní. Zmínit je třeba rok 2007. Ačkoliv se tento rok řadí mezi absolutně nejsušší, pouze v jednom případě byl průtok menší než stanovená velikost průtoku Q_{355} .



Graf 8: Počet suchých dní v jednotlivých letech. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Graf 9: Sezónní rozložení suchých dní na profilu Loděnice ve sledovaném období. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Graf č. 9 popisuje rozložení jednotlivých suchých dní v roce. Na první pohled je patrné, že většina suchých dní se vyskytuje v druhé polovině roku. Nejvíce dní hydrologického sucha je řazeno do srpna a září. V obou případech se na tyto měsíce váže více než 27 % suchých dní z celkového počtu 403. Obecně můžeme říci, že díky vyšším teplotám a následné vyšší evapotranspiraci se nízké průtoky objevují v letních měsících, ovšem ve vybraném povodí to v červnu a červenci není až tak výrazné. Nulový výskyt počtu dní hydrologického sucha byl zaznamenán v únoru, dubnu a prosinci.

5.4.2 Analýza nedostatkových objemů

Dalším způsobem vyhodnocování hydrologického sucha je pomocí metody nedostatkových objemů. Tato metoda spočívá ve vymezení období s průtokem nižším, než je zvolený limitní průtok (v této práci Q_{355}).

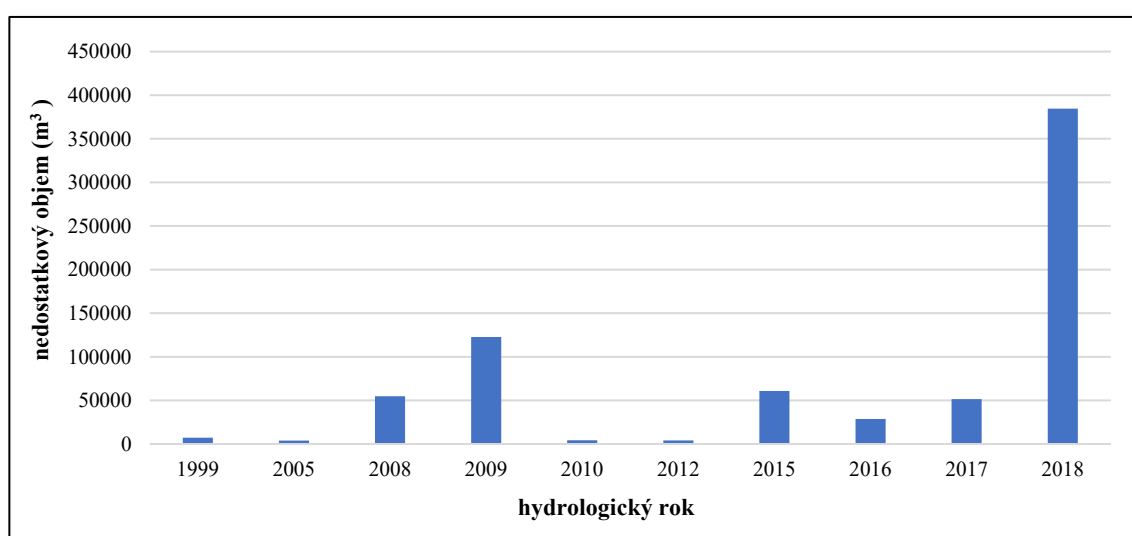
V tabulce č. 7 jsou uvedena hydrologická sucha, která byla analyzována na základě této metody a jejich doba trvala minimálně dva dny. Graf č. 10 má podobný průběh jako graf znázorňující počet suchých dní v jednotlivých letech (graf č. 8).

Z hlediska nedostatkových objemů bylo nejextrémnější sucho v posledním měřeném roce 2018, které trvalo dlouhých 125 dní. Toto extrémní sucho s nedostatkovým objemem 384 601 m³ tvořilo objem přes 50 % z celkového úhrnu nedostatkového objemu. Druhým extrémním případem bylo hydrologické sucho z roku 2009 s nedostatkovým objemem 122 731 m³. Povšimnout si také můžeme odlišného rozložení období v průběhu roku. Například sucho v roce 1999 mělo svůj počátek až 12. října, oproti tomu nedávné sucho v roce 2017 již 1. června. V tabulce můžeme vidět, že suché periody se převážně vážou na letní měsíce. Ovšem nelze opomenout podzim, který je s výskytem hydrologického sucha úzce spojen. Z grafu č. 10 je patrné, že nedostatkové objemy v posledních letech rostou nestále nahoru.

Tabulka 7: Nedostatkové objemy v pozorovaném období 1977–2018.

rok	počátek období	konec období	počet dní	nedostatkový objem (m ³)
1999	12. 10.	21. 10.	10	7 171
2005	22. 8.	24. 8.	3	3 897
2008	27. 8.	4. 10.	39	54 821
2009	9. 8.	30. 9.	53	122 731
2010	14. 7.	16. 7.	3	4 337
2012	27. 8.	29. 8.	3	4 087
2015	10. 7.	15. 8.	36	60 895
2016	27. 8.	16. 9.	21	28 702
2017	1. 6.	28. 6.	28	51 391
2018	21. 6.	24. 10.	125	384 601

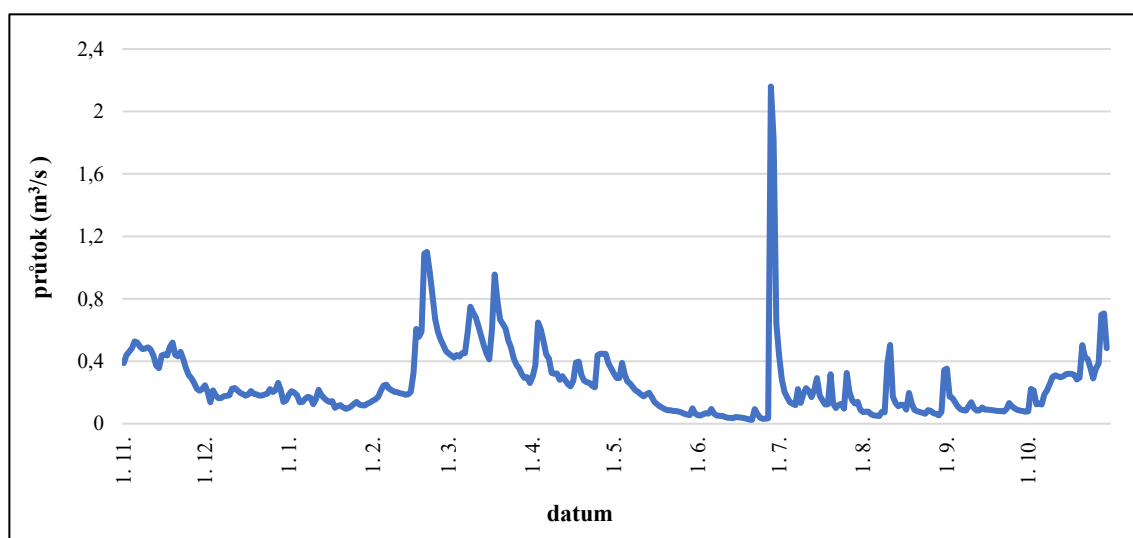
Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



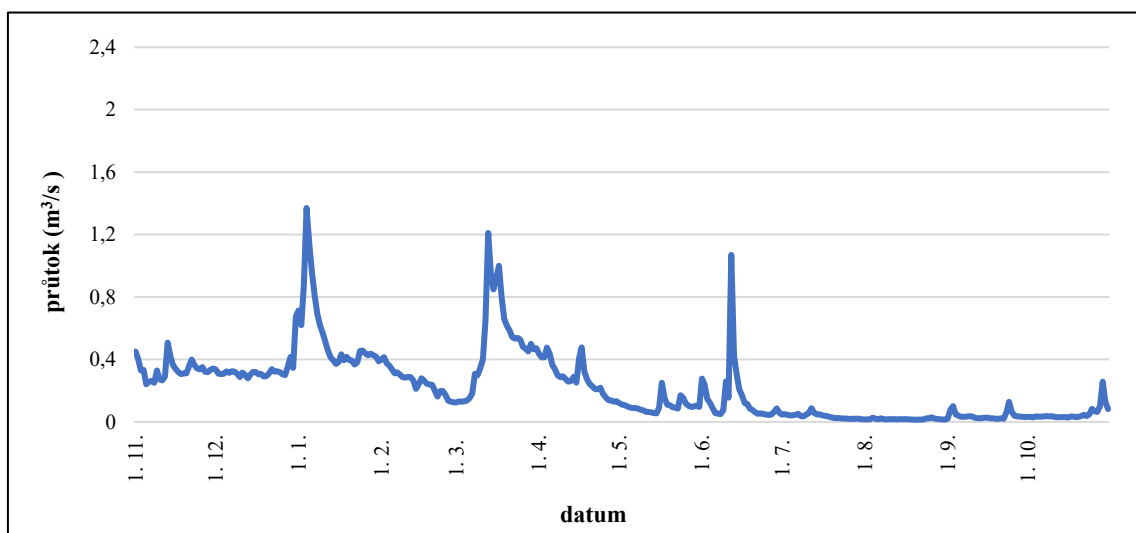
Graf 10: Nedostatkové objemy v pozorovaném období 1977–2018. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

5.4.3 Sucho na Loděnice v letech 2017 a 2018

Do samostatné kapitoly byla vyčleněna poslední dvě velká hydrologická sucha v letech 2017 a 2018. Oba roky jsou součástí suché periody, která trvá již několik let. Graf č. 11 a 12 popisuje rozložení denních průtoků v rámci celého hydrologického roku. Průměrný roční průtok v roce 2017 byl $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$, kdežto v roce 2018 $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$. Při porovnání obou grafů si můžeme povšimnout odlišného rozložení denních průtoků. Až na jeden extrémní výkyv ze dne 22. června bylo rozložení denních průtoků v roce 2017 vcelku rovnoměrné. Zpočátku hydrologického roku 2017 byly průtoky nízké a nepřesahovaly $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. V důsledku jarního tání sněhové pokrývky lze pozorovat vysoký nárůst v půlce března. Od května vykazují denní průtoky klesající trend trvající až do konce června. Právě toho období se dá považovat za vrchol hydrologického sucha v roce 2017. Výjimečný průtok byl naměřen dne 29.6., kdy se průměrný denní průtok dostal přes hodnotu $2 \text{ m}^3/\text{s}$. V červenci se hodnoty vrátily zpět k ročnímu průměru. V roce 2018 (graf č. 12) mají průměrné denní průtoky úplně jiný chod. Od počátku hydrologického roku do půlky měsíce června jsou denní průtoky značně vyšší. V tomto období můžeme pozorovat tři extrémní výkyvy, které se objevily na začátku ledna a v polovině března a června. Druhá část roku od již zmíněné půlky června byla o poznání sušší. Pouze v jednom případě bylo dosaženo hodnoty průtoku $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Za vrchol hydrologického sucha v roce 2018 se dá považovat období od počátku srpna do konce října, ve kterém bylo zároveň dosaženo absolutního minima dne 20. srpna, kdy byl naměřen průtok $0,014 \text{ m}^3/\text{s}$.



Graf 11: Chod denních průtoků v hydrologickém roce 2017. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Graf 12: Chod denních průtoků v hydrologickém roce 2018. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

V tabulkách č. 8 a 9 jsou uvedeny extrémně naměřené hodnoty pro vybrané roky. Při porovnání obou tabulek lze již na první pohled konstatovat, že v hydrologickém roce 2018 mělo sucho větší rozměry. V tomto roce bylo 20. srpna naměřeno absolutní minimum, naopak maximum v roce 2017 dne 29. června. Všimnout si můžeme odlišného vrcholu hydrologického sucha. V roce 2017 byly nejnižší hodnoty naměřeny v červnu, kdežto v roce 2018 o dva měsíce později. Rozdíl nalezneme i u nejvyšších naměřených hodnot. První dvě maxima roku 2017 jsou z června, zatímco všechny tři hodnoty roku 2018 byly naměřeny v lednu a březnu.

Tabulka č. 8: Extrémní hodnoty průtoků v roce 2017.

den	nejnižší hodnoty	den	nejvyšší hodnoty
22. 06. 17	0,0245	29. 06. 17	2,16
21. 06. 17	0,0271	30. 06. 17	1,82
26. 06. 17	0,0306	22. 02. 17	1,10

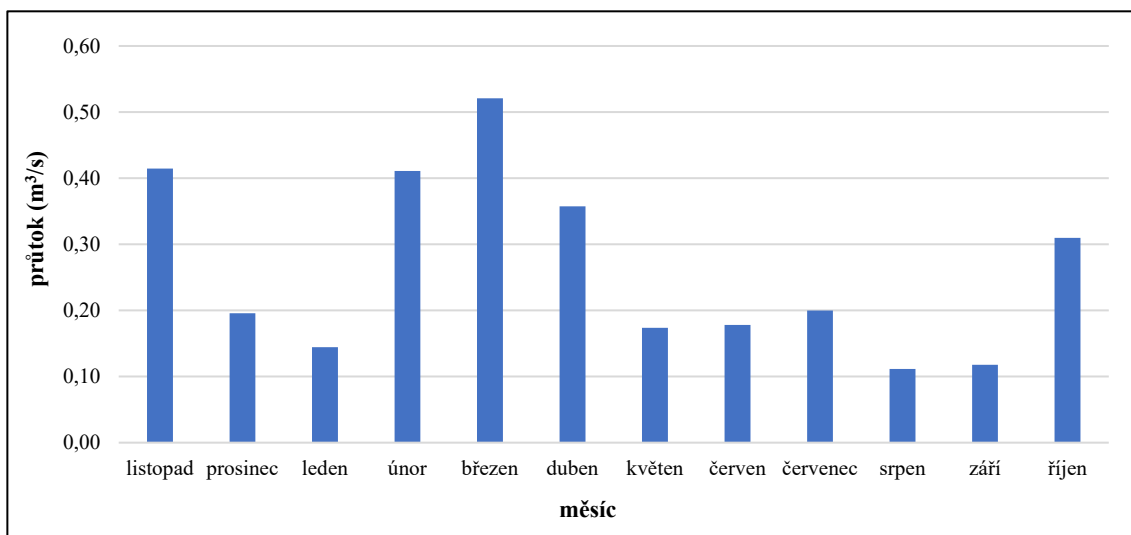
Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Tabulka 9: Extrémní hodnoty průtoků v roce 2018.

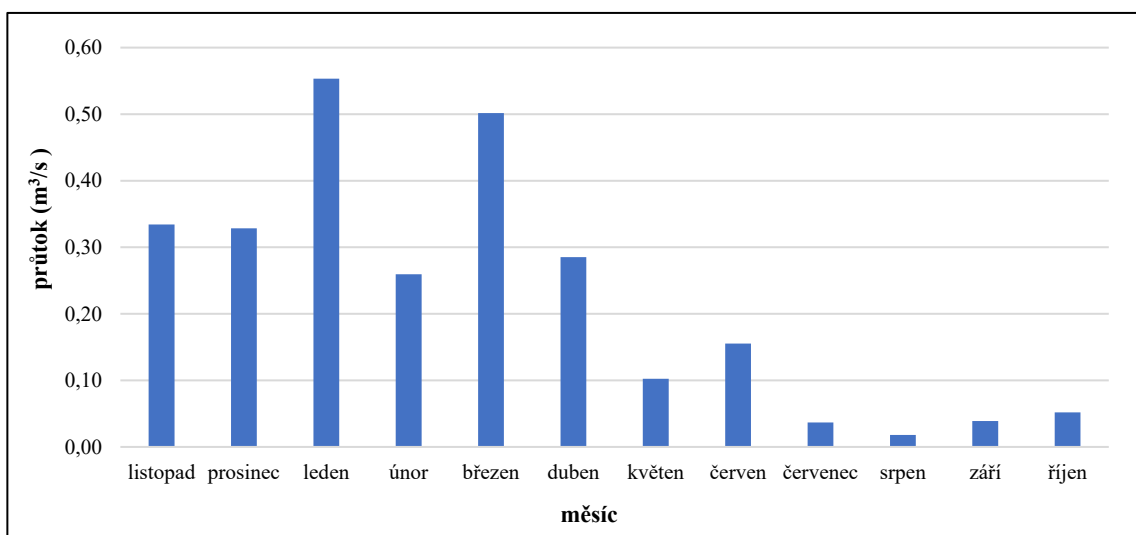
den	nejnižší hodnoty	den	nejvyšší hodnoty
20. 08. 18	0,014	04. 01. 18	1,37
21. 08. 18	0,0142	13. 03. 18	1,21
22. 08. 18	0,0148	05. 01. 18	1,14

Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

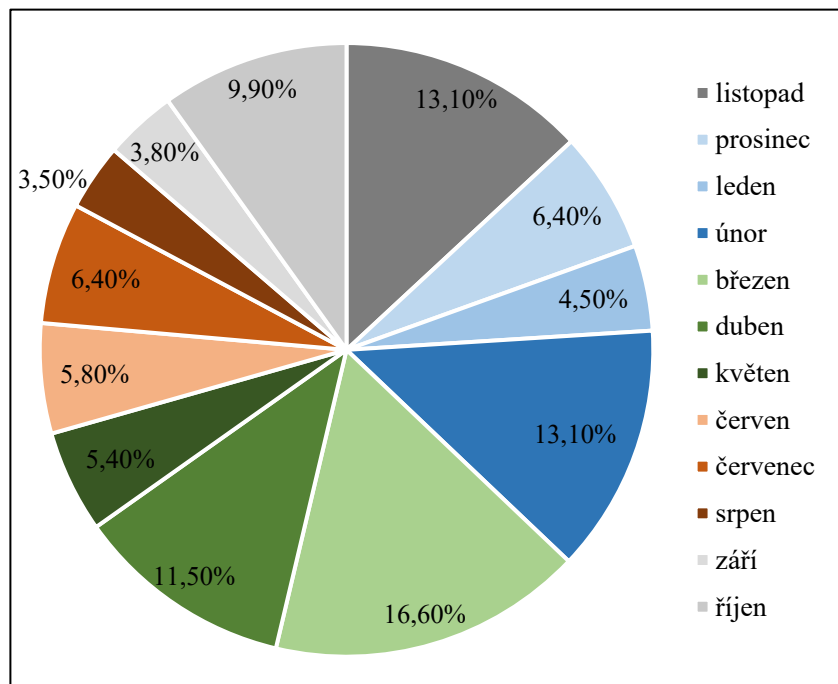
Rozložení měsíčních průtoků ve vybraných letech je zobrazeno na grafech č. 13 a 14. Grafy v zásadě kopírují předešlé chody denních srážek. Rok 2017 má oproti roku 2018 vyrovnanější průběh a jeho hodnoty průměrných měsíčních průtoků jsou o něco vyšší. V důsledku jarního tání sněhu byl nejvodnější měsíc v roce 2017 březen, kdy bylo dosaženo hodnoty $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Rok 2018 můžeme rozdělit na dvě periody. V první části hydrologického roku se téměř všechny hodnoty měsíčních průtoků vyšplhaly k $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Druhá polovina roku je podstatně sušší. Od května do října nebylo dosaženo ani v jednom případě hodnoty $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Nejvodnější měsíc roku 2018 je leden, nejsušší naopak srpen, kdy vyvrcholilo hydrologické sucho. Roční nevyrovnanost průtoků je také zobrazena na grafech č. 15 a 16. Na nich je zachycen procentuální podíl jednotlivých měsíců na celkovém ročním odtoku. Grafy v zásadě potvrzují již výše zmíněné skutečnosti. V roce 2017 byl odtok mnohem vyrovnanější než v roce 2018. Nejvyšší podíl na celkovém odtoku v roce 2017 byl v březnu a v roce 2018 v lednu. Nejnižší podíl na ročním odtoku je v obou případech v srpnu. Pro vybrané roky byla vyjádřena rozkolísanost průtoků pomocí křivky překročení a z ní následně odečteny M–denní průtoky. Tvar čáry překročení znázorňují grafy č. 17 a 18. Na nich si můžeme všimnout malých rozdílů mezi jednotlivými roky, avšak z tabulek M–denních průtoků (tabulka č. 10 a 11) vyplývá, že variabilita odtoku byla v roce 2017 lehce vyšší.



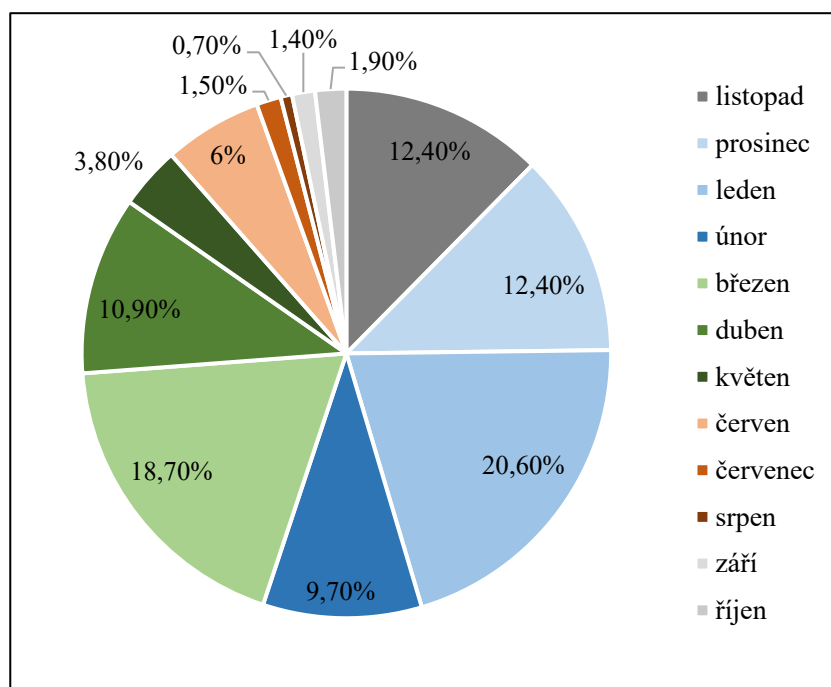
Graf 13: Průměrné měsíční průtoky v hydrologickém roce 2017. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Graf 14: Průměrné měsíční průtoky v hydrologickém roce 2018. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Graf 15: Podíl měsíců na ročním objemu odtoku v roce 2017. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

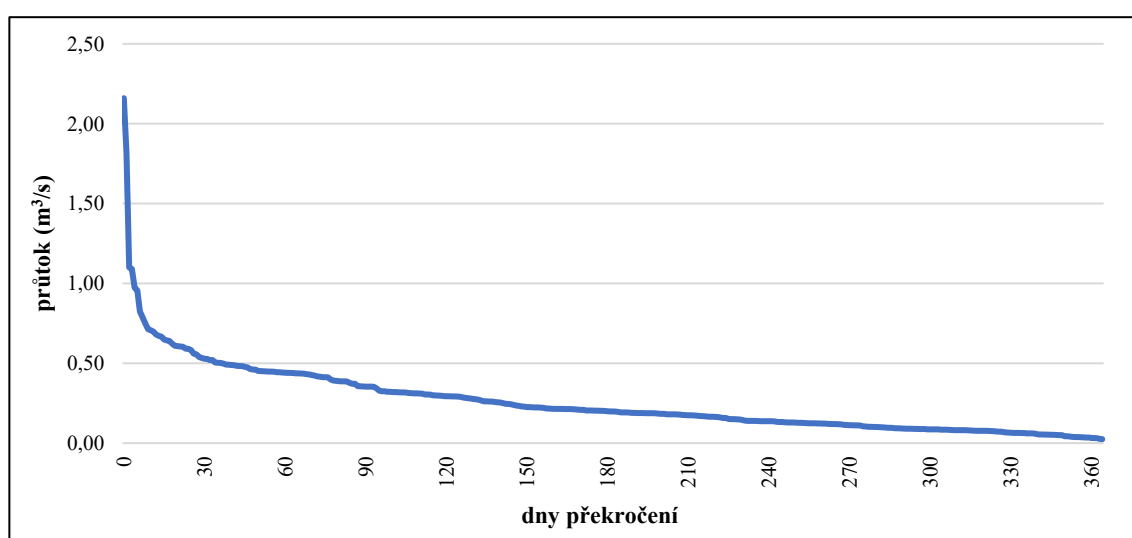


Graf 16: Podíl měsíců na ročním objemu odtoku v roce 2018. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Tabulka 10: Hodnoty M–denních průtoků pro profil Loděnice za rok 2017.

průtok	Q30	Q60	Q90	Q120	Q150	Q180	Q210	Q240	Q270	Q300	Q330	Q360
m ³ /s	0,53	0,44	0,36	0,3	0,23	0,2	0,18	0,14	0,11	0,09	0,07	0,03

Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

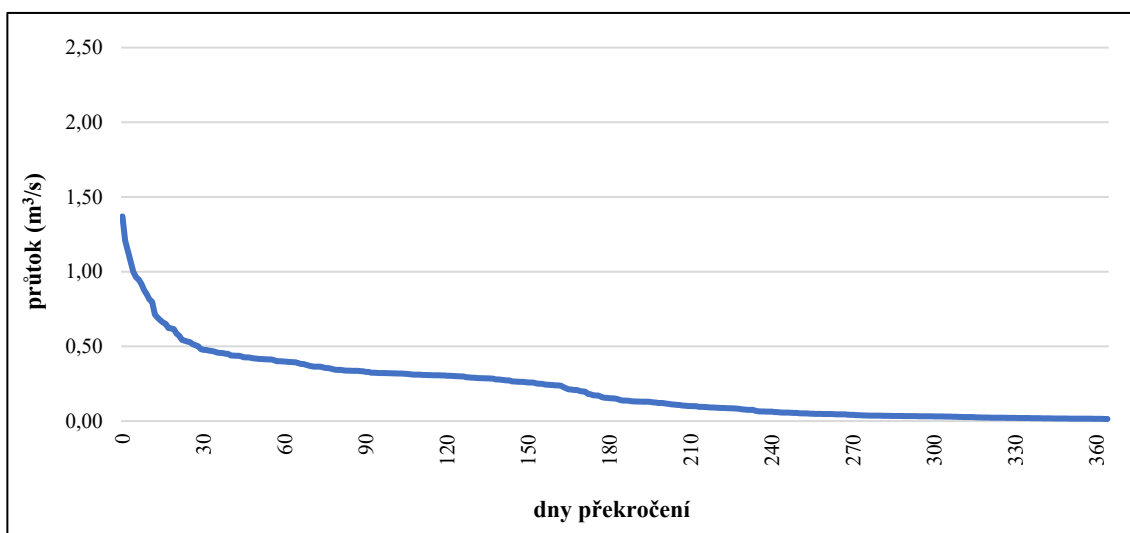


Graf 17: Křivka překročení M–denních průtoků pro rok 2017. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Tabulka 11: Hodnoty M–denních průtoků pro profil Loděnice za rok 2018.

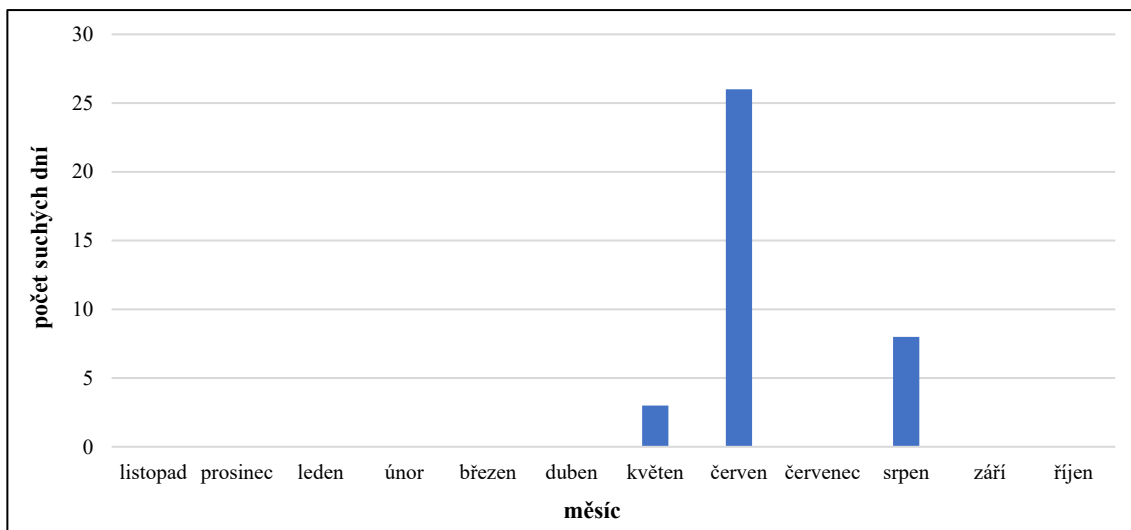
průtok	Q30	Q60	Q90	Q120	Q150	Q180	Q210	Q240	Q270	Q300	Q330	Q360
m ³ /s	0,48	0,4	0,33	0,31	0,26	0,16	0,1	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02

Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

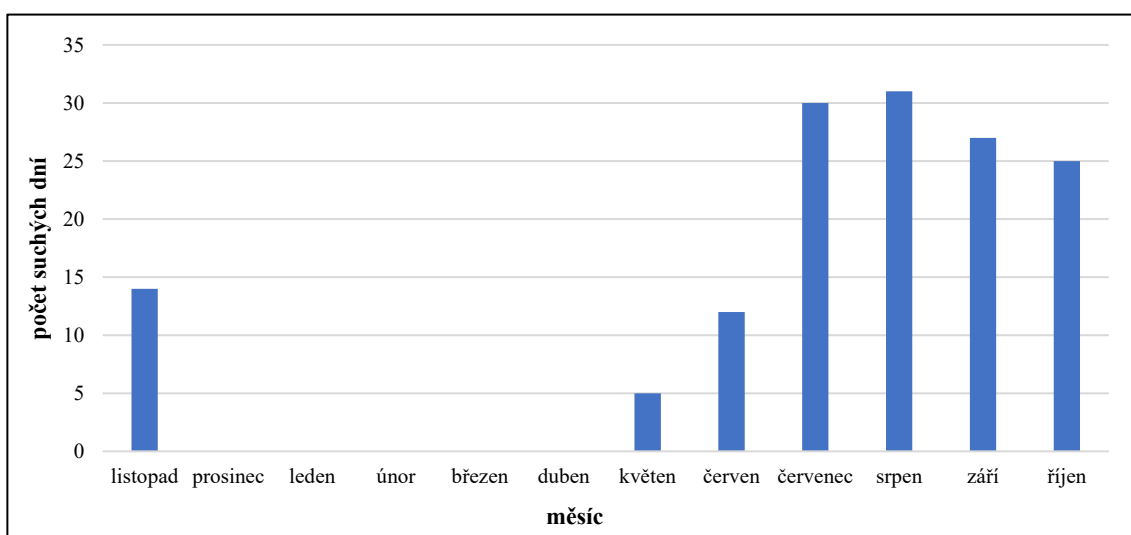


Graf 18: Křivka překročení M–denních průtoků pro rok 2018. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

V kapitolách 5.4.1 a 5.4.2. bylo hodnoceno hydrologické sucho za celé pozorované období dvěma způsoby. Prvním z nich je analýza sucha na základě stanovení počtu suchých dní. Ve druhém případě je sucho vyhodnoceno pomocí metody nedostatkových objemů. Tyto dvě metody byly použity pro detailnější analýzu vybraných let. Hodnocení podle počtu suchých dní je znázorněno na grafech č. 19 a 20. V roce 2017 bylo celkem 37 hydrologicky suchých dní. Jejich rozmístění v rámci roku je velmi nerovnoměrné. Nejvíce suchých dní se vyskytlo v červnu, poté v srpnu a v květnu. Za to rok 2018 byl na hydrologicky suché dny velice bohatý. Z celkového počtu dní v roce jich 144 označujeme za hydrologicky suché. Na první pohled je z grafu č. 20 patrné, že jejich rozmístění je o poznání pravidelnější než v předchozím roce. Perioda suchých dní začíná v květnu a končí až listopadu. Nejvíce dní bylo zjištěno v červenci a zejména v srpnu, kdy vyvrcholilo hydrologické sucho roku 2018.

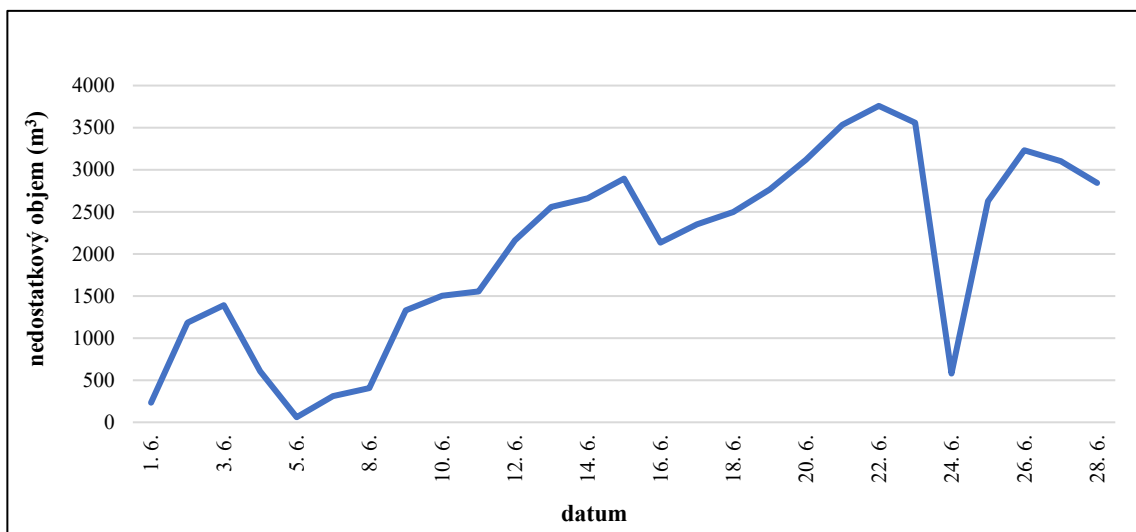


Graf 19: Počet dní pod hranicí hydrologického sucha v roce 2017 v jednotlivých měsících. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



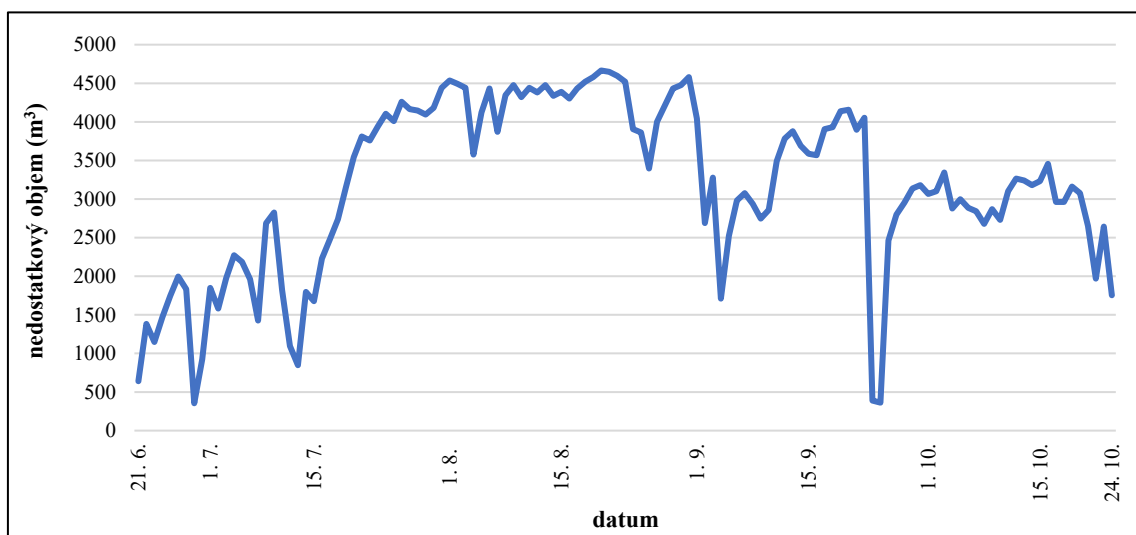
Graf 20: Počet dní pod hranicí hydrologického sucha v roce 2018 v jednotlivých měsících. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Druhé vyhodnocení sucha bylo pomocí metody nedostatkových objemů. V předchozích kapitolách byla tato metoda použita na celé zkoumané období. Níže uvedené grafy č. 21 a 22 se však detailněji zaměřují na dva vybrané roky, respektive na jejich hydrologický rok. V roce 2017 začala suchá perioda oproti roku 2018 poněkud dříve. Toto období však trvalo necelý měsíc, konkrétně od 1. do 28. června. Vývoj nedostatkových objemů v roce 2017 je znázorněn na grafu č. 21. Všimnout si můžeme rostoucího trendu, který vyústil dne 22. června. V tomto dni byl vypočten chybějící objem do průtoku Q_{355} celkem $3\,758,4\text{ m}^3$.



Graf 21: Nedostatkové objemy suché periody roku 2017. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Suché období v roce 2018 mělo mnohem výraznější charakter. Celkový nedostatkový objem za hydrologický rok 2018 činil 384 601 m³/s, což je polovina všech objemů za celé pozorované období. Všimnout si můžeme pozdějšího začátku suché periody, která ovšem trvala o poznání déle než v předchozím roce. Vrcholem suché periody tohoto roku byla druhá polovina srpna, ve které bylo dosaženo zároveň absolutního maxima dne 20. srpna, kdy nedostatkový objem činil 4665,6 m³/s.



Graf 22: Nedostatkové objemy suché periody roku 2018. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



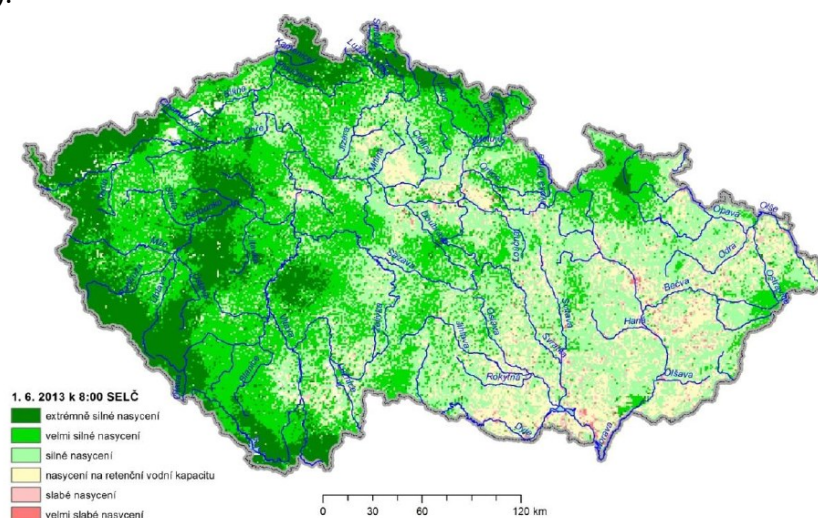
Obrázek 11: Projevy sucha v srpnu roku 2018 na horní části toku. Zdroj: vlastní fotografie.



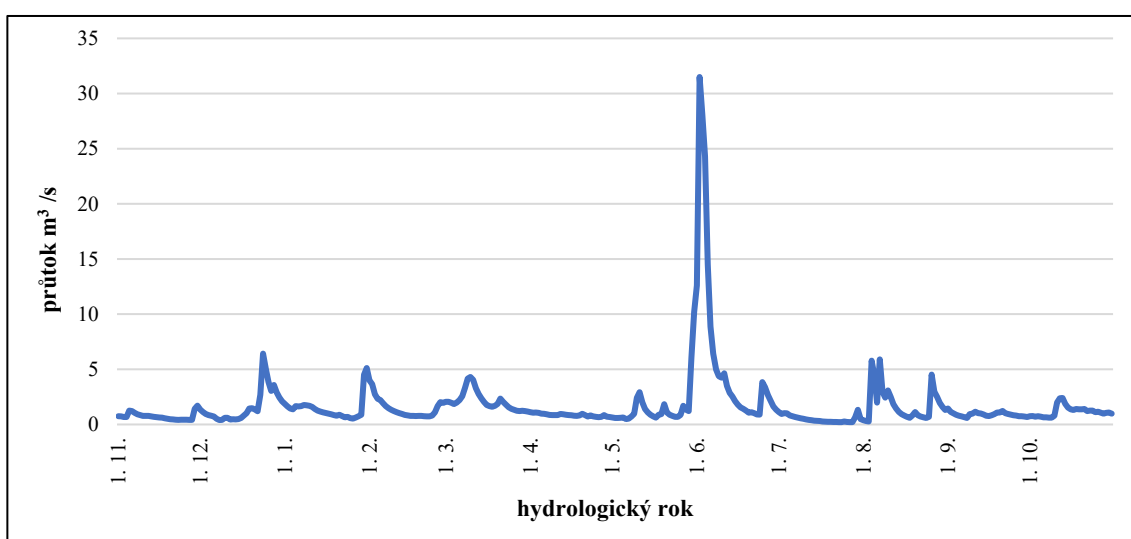
Obrázek 12: Projevy sucha v srpnu roku 2018 na horní části toku. Zdroj: vlastní fotografie.

5.4.4 Povodně v roce 2013

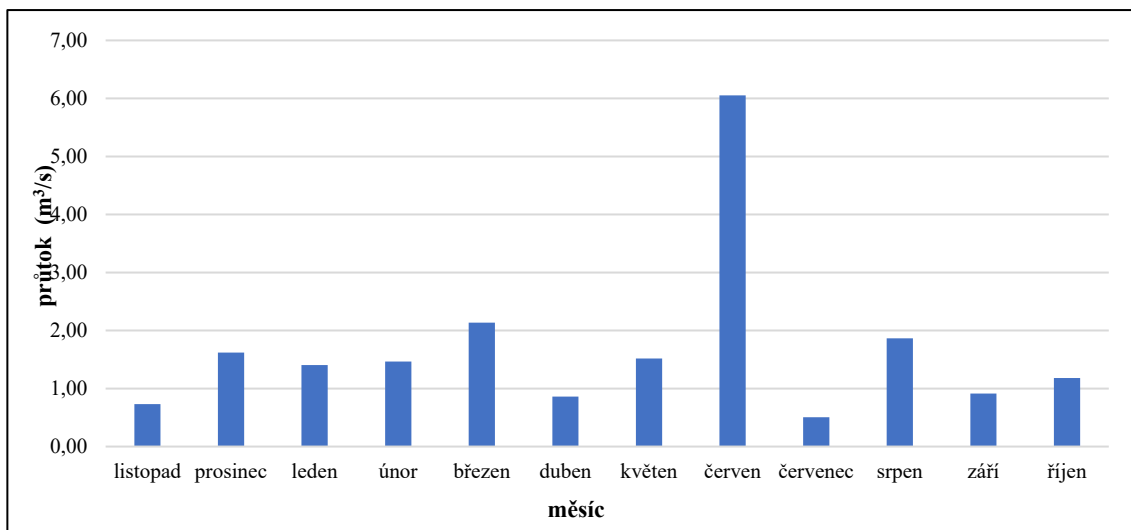
Posledními povodněmi v povodí Loděnice byly povodně v průběhu června roku 2013 způsobené vydatnými srážkami, které měly v průběhu tohoto měsíce tři epizody. První epizoda (29. května až 3. června) zasáhla obzvláště Čechy. Druhá (9. až 11. června) a třetí (24. až 25. června) epizoda nebyla v povodí Loděnice tak patrná jako první. Příčinou první epizody srážek byla tlaková níže vytvořena 30. května na frontální vlně východním směrem od Česka, která následně začala postupovat nad naše území. Počátek povodní na Loděnici je uváděn 30. května. Nelze však opomenout, že v důsledku vydatnějších srážek již v měsíci květnu byla většina povodí značně nasycena (Daňhelka a kol. 2019).



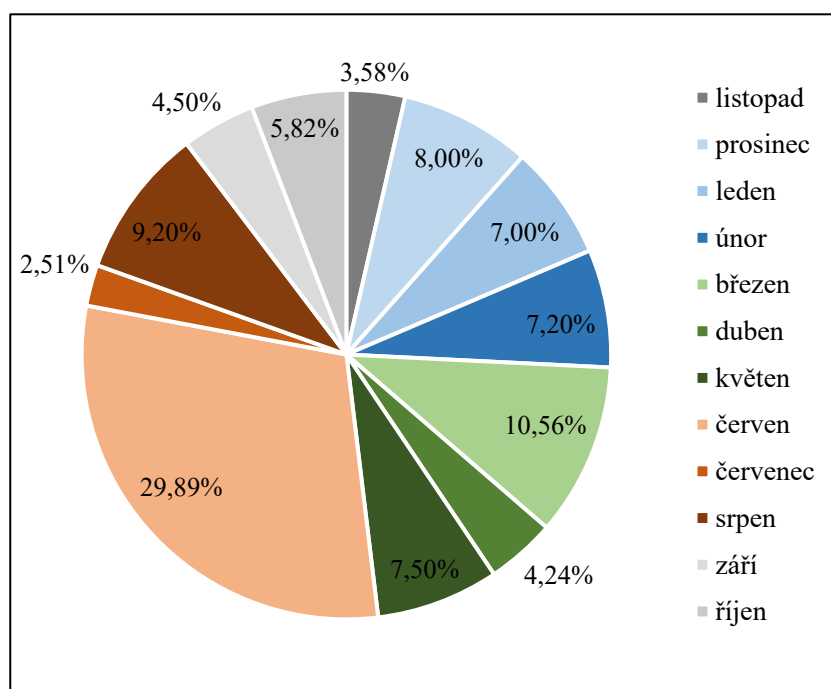
Obrázek 13: Ukazatel nasycení k 1. 6. 2013 8:00 SELČ. Zdroj: ČHMÚ.



Graf 23: Chod denních průtoků v hydrologickém roce 2013. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

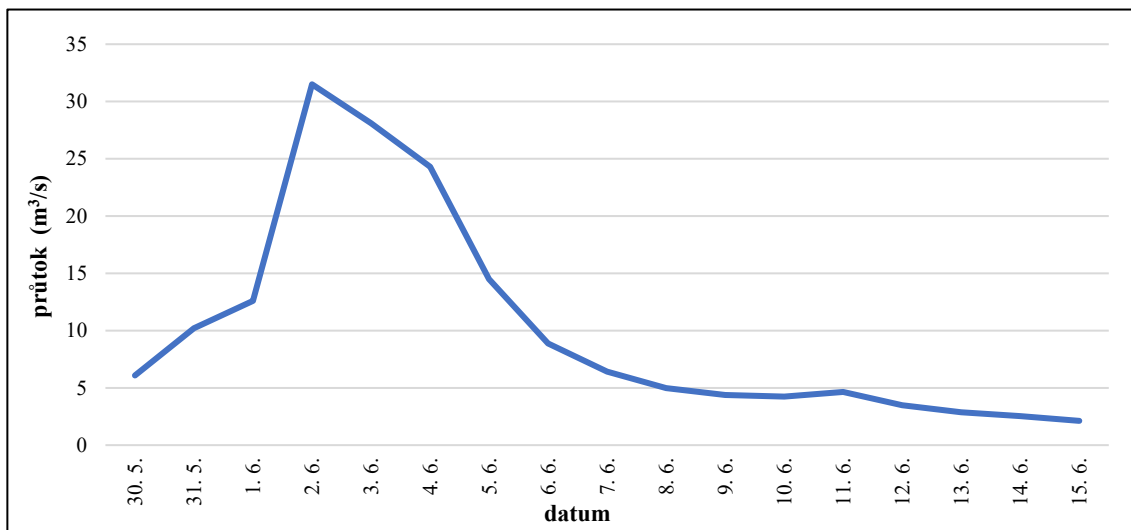


Graf 24: Průměrné měsíční průtoky v hydrologickém roce 2013. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Graf 25: Podíl měsíců na ročním objemu odtoku v roce 2013. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

Graf č. 23 znázorňuje rozložení denních průtoků v celém hydrologickém roce. Z dlouhodobého hlediska se jedná o vysoce nadprůměrné hodnoty zapříčiněné hlavně červnovými povodněmi. Průměrný roční průtok je $1,69 \text{ m}^3/\text{s}$, což je nejvyšší hodnota za celé pozorované období 1977–2018. Graf č. 24 nám udává rozložení průměrných měsíčních průtoků v roce 2013. Většina průměrných měsíčních průtoků přesahuje hodnotu $1 \text{ m}^3/\text{s}$, což je v případě vodního toku Loděnice velmi neobvyklé. Na grafu č. 25 je znázorněn podíl měsíců na celkovém ročním odtoku. Ten je dominantní v době povodní, tedy v měsíci červnu. Naopak nejnižší podíl má měsíc červenec, ve kterém byl průměrný měsíční průtok stanoven $0,51 \text{ m}^3/\text{s}$. Z grafu č. 26 je patrný nárůst průměrných denních průtoků začínající 30. května a vrcholící 2. června, kdy bylo dosaženo průtoku $31,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Následující 3 dny se držel průtok mezi 20 a $30 \text{ m}^3/\text{s}$ a poté začal prudce klesat. Nejvyšší hodnota na limnigrafické stanici Loděnice byla zaznamenána 2. června v 7.20 hod, kdy bylo dosaženo průtoku $38,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a kulminačního vodního stavu 262 cm (Daňhelka a kol. 2019).



Graf 26: Průměrné denní průtoky v období od 30.5. do 15.6. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.



Obrázek č. 14: Povodně v roce 2013 v obci Kamenné Žehrovice. Zdroj: vlastní zpracování dat ČHMÚ.

6. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE

Hydrologické sucho je rizikový přírodní jev, kterému je v poslední době věnována stále větší pozornost. Charakterizováno je svým nenápadným a pomalým vývojem, avšak jeho následky často trvají velmi dlouho. Vznik hydrologického sucha je podmíněn několika faktory, z nichž nejdůležitějším je v současné době nárůst teplot na Zemi.

Klimatická změna byla dlouho pro většinu lidí pouze jakousi virtuální realitou a pojmem, se kterým si hrají pouze média. Avšak nutno podotknout, že po opakovaně vysokých letních teplotách a srážkových deficitech v posledních letech si společnost začala řádně uvědomovat důležitost vody. Lidé začínají poznávat samotné projevy sucha, začínají řešit aktuální sucho se svým okolím a jeho možné projevy v budoucnu. Změna klimatu se projevuje zvýšeným výparem z vodních ploch a zvýšenou potřebou vody pro zemědělství (Janský 2017). S tím je samozřejmě spojen i negativní vliv lidské činnosti, při které dochází ke snižování retenční schopnosti povodí, což má v době hydrologického sucha velký vliv. Naučit se zadržet povrchovou vodu v období jejího nadbytku může být jedním z dalších adaptačních opatření eliminujících vznik nebo alespoň zmírnění hydrologického sucha. Dalším negativním vlivem lidské společnosti je například nadměrná spotřeba vody nejen v Česku, ale po celém světě.

Hlavním cílem práce byla analýza projevů hydrologického sucha v povodí Loděnice. Tato ne příliš známá oblast však v sobě skrývá cenné přírodní bohatství, o které je potřeba pečovat. Jedním z klíčových činitelů péče je voda. Povodí leží ve srážkově chudé oblasti, a proto je potřeba se naučit s vodou správně hospodařit. Primárním úkolem práce je vyhodnotit, zda se v této oblasti stále častěji v posledních letech projevuje hydrologické sucho či nikoliv.

První část práce rešeršního charakteru je zaměřena na komplexní pochopení sucha. Z důvodu neexistence jednotných kritérií pro správné vymezení sucha jsou představeny jeho lišící se definice od mnohých zahraničních i tuzemských autorů. Díky odlišným projevům sucha lze rozeznávat i několik typů sucha, jež jsou v práci uvedeny. Velice podstatnou kapitolou práce jsou příčiny a možné dopady sucha, ať už na okolní krajinu nebo na lidskou společnost. Podstata sucha byla dána do souvislosti s fyzickogeografickými a antropogenními faktory, které mají velmi vliv pro jeho vznik. Představeny jsou zároveň indexy, pomocí kterých je sucho měřeno. Se samotnými indexy bude pracováno až v navazující magisterské práci.

Ve druhé části práce byla vyhodnocena vstupní data, která jsou v podobě průměrných denních průtoků z limnigrafické stanice Loděnice, ze kterých byly následně vypočteny průtoky měsíční a roční. Z nich bylo poté vyhodnoceno hydrologické sucho na základě počtu suchých dní a pomocí metody prahové hodnoty.

Z hlediska průměrných denních průtoků za sledované období 1977–2018 je dobré si povšimnout klesajícího trendu z posledních let. Tento trend lze pozorovat od posledních velkých povodních z roku 2013. Stejně jako u většiny českých řek je vyšších stavů dosahováno v jarních obdobích, především v měsíci březnu, kdy taje sníh. Naopak nejnižší vodnost vykazuje měsíc červenec, u kterého jsou hodnoty více než poloviční oproti březnu. V rámci ročních období jsou minimální průtoky směřovány do podzimních měsíců, které mají na ročním odtoku podíl 18,62 %. Oproti tomu nejvyšší podíl mají jarní měsíce. Variabilita průtoků je patrná i v rámci jednotlivých let pozorovaného období. Povšimnout si lze střídání sušších a vodnějších roků. Z hlediska hodnocení průměrných ročních průtoků za mimořádně vodné můžeme označit roky s průměrným ročním průtokem nad $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Jedná se o roky 1978, 1979, 1995, 2011 a 2013. Vysoká hodnota průtoků v posledním zmiňovaném roce je způsobena červnovými povodněmi, kterými bylo povodí Loděnice v nemalé míře zasaženo. Naopak suchých let je ve sledovaném období o poznání více. Mezi úplně nejsušší můžeme řadit roky 2007, 2008 a poslední dva hydrologické roky 2017 a 2018. Rozdíl mezi nejsušším rokem 2007 a nejvodnějším rokem 2013 z hlediska průměrných ročních průtoků Q_r je téměř osminásobný. V roce 2007 činil průměrný roční průtok pouze $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$, kdežto v roce 2013 byl $1,69 \text{ m}^3/\text{s}$.

Důležitou kapitolou práce je vyhodnocení samotného hydrologického sucha v povodí Loděnice. Jak již bylo řečeno, pro tuto analýzu byly vybrány dvě metody. Pro limnigrafickou stanici Loděnice byla zvolena prahová hodnota průtoků Q_{355} , která byla vzata z portálu ČHMÚ. Pomocí ní byl stanoven počet hydrologicky suchých dní. Stanice Loděnice zaznamenala celkem 403 hydrologicky suchých dní, které jsou v pozorovaném období velmi nerovnoměrně rozloženy. Výsledky však dokazují výskyt hydrologického sucha v posledních letech. Od roku 2015, který byl v celém Česku velice suchý, bylo v každém roce minimálně 20 suchých dní. V roce 2018 bylo z celkového počtu dní v roce dokonce 144 označeno za hydrologicky suché. Nutno podotknout, že průměrné roční průtoky ne vždy korelují s výskytem suchých dní. Například rok 2007 je co se týče průměrného ročního průtoků nejsušší, avšak pouze jeden den v roce považujeme za

hydrologicky suchý den. Nejvíce dní hydrologického sucha z celého sledovaného období se váže k měsícům srpnu a září.

Druhou zvolenou metodou pro analýzu hydrologického sucha je metoda nedostatkových objemů s využitím limitní hodnoty Q_{355} . Výsledky naznačují, že výskyt hydrologického sucha v povodí Loděnice není v posledních letech náhodný. Tato metoda dokazuje, že od počátku 21. století se zde pravidelně sucho vyskytuje. Za zmínku stojí opět rok 2018, kdy suchá perioda trvala neuvěřitelných 125 dní. Nedostatkový objem tohoto období činil $384\,601\text{ m}^3$, což tvoří přes polovinu z celkového součtu všech objemů.

Studiem hydrologického sucha se zabývalo či v současné době zabývá několik studentů z Katedry fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Jednou ze závěrečných prací zkoumající hydrologické sucho je studie od Skály (2017), který svou práci zaměřil do pramenných oblastí šumavských toků. Tato práce se zabývá vyhodnocováním hydrologického sucha na sedmi profilech v šumavském regionu v obdobích 1931–1937 a 1949–2014. Takto dlouhá časová řada je pro posouzení hydrologického sucha jistě výhodou. Autor si kladl za cíl zvolit účelné indexy hydrologického sucha a ty následně aplikovat na vstupní data. Hlavním úkolem bylo vzájemné porovnání výsledků z jednotlivých profilů. Oproti této práci, kde bylo hydrologické sucho vyhodnoceno pomocí metody prahové hodnoty a nedostatkových objemů, byla studia Skály (2017) doplněna o metodu dle Gumbela (1963). Z výsledků byly následně vyhodnoceny trendy za použití Mann–Kendallova a Hirsch–Slackova testu. Stejně jako v této práci autor pracuje s limitní hodnotou Q_{355} . Skála (2017) došel k závěru, že sezonalita hydrologického sucha návětrných a závětrných profilů je podstatně jiná. Výsledky lze však těžko porovnávat. Cílem této práce bylo primárně zjištění hydrologického sucha v posledních letech, proto bylo sucho hodnoceno pomocí časové řady do roku 2018. Skála (2017) ve své práci pracuje sice s daty od roku 1931, ovšem posledním hydrologickým rokem je rok 2014. Nutno však sdělit, že rozložení počtu suchých dní je ve vzájemné interakci s výsledky této práce. Většina suchých dní je orientována do podzimních měsíců, kdy vrcholil v povodí Loděnice hydrologické sucho.

Další závěrečnou prací řešící problematiku sucha je diplomová práce Šachové (2013). Tato studie se zabývá vlivem klimatické změny na hydrologické sucho v povodí horní Otavy. Autorka používá pro vyhodnocení metody prahové hodnoty průtok Q_{90} . Uvádí, že při použití tohoto limitního průtoky je schopna lépe určit hydrologické sucho

po roce 1990. Nastavení vyšší limitní hodnoty by totiž zakrývalo významná sucha. Šachová (2013) řeší problematiku sucha v širokém kontextu. Její práce je dělena do čtyř částí, přičemž hlavním cílem je analyzovat projevy hydrologického sucha ve vybraném povodí ve vztahu ke změnám klimatu. Jistou výhodou pro práci Šachové (2013) je fakt, že ve vybraném povodí se nachází tři profily, ze kterých byla poskytnuta vstupní data. Šachová (2013) ve své studii pracovala s metodou mezní hodnoty (Threshold limit) a algoritmem následných vrcholů. Pomocí takto dlouhých časových řad je analýza sucha mnohem přesnější a vypovídající. Výsledky práce Šachové (2013) jsou v porovnání s touto prací značně odlišné. Autorka uvádí, že největší sucho v povodí horní Otavy se vyskytlo na přelomu let 1962 a 1963, kdežto v této práci je zřejmý nárůst hydrologického sucha v posledních letech.

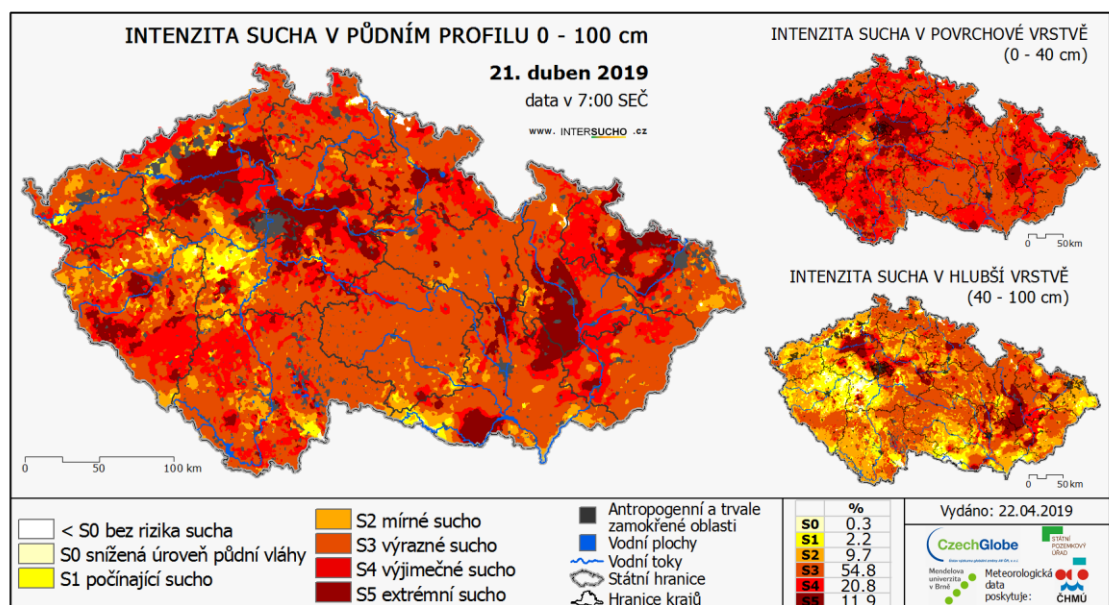
Za zmínku stojí jistě i závěrečná práce Marouškové (2016), která hydrologické sucho zkoumala v nedalekém povodí Rakovnického potoka. Hlavní cílem bylo primárně vyhodnotit hydrologicky suchá období na základě časové řady poskytnuté Českým hydrometeorologickým ústavem. Stejně jako v předchozí práci je velkou výhodou větší počet limnigrafických stanic v povodí. Jedná se o stanice Rakovník, Křivoklát, Oráčov a Kounov. Datové řady byly poskytnuty od počátku 60. let 20. století. Maroušková (2016) ve své práci pracuje s metodami pro analýzu dlouhodobých a sezónních trendů. Stejně jako u Skály (2017) byl v práci použit Mann–Kendallův test, dále analýza IHA, křivky překročení a součtové čáry. Hydrologické sucho bylo vyhodnoceno pomocí odtokového indexu sucha (SDI), který byl v této práci pouze představen, nikoliv použit. Autorka dále aplikovala index Low Flow a průtoky nižší než prahová hodnota $Q_{95\%}$. Počet hydrologicky suchých dní v práci od Marouškové (2016) činil 825, což je zhruba o polovinu více než v je uvedeno v této práci. Autorka však dochází k podobným výsledkům. Zvýšený výskyt nízkých průtoků je zaznamenán po roce 1990. Matoušková (2016) ve své práci zmiňuje extrémně suchý rok 2007, který taktéž v této studii vykazuje z hlediska průměrných ročních průtoků absolutně nejnižší hodnoty. Obdobně je na tom i rozložení nízkých průtoků v průběhu roku. Nejvíce jich je zaznamenáno v letních měsících, zejména v srpnu.

7. ZÁVĚR

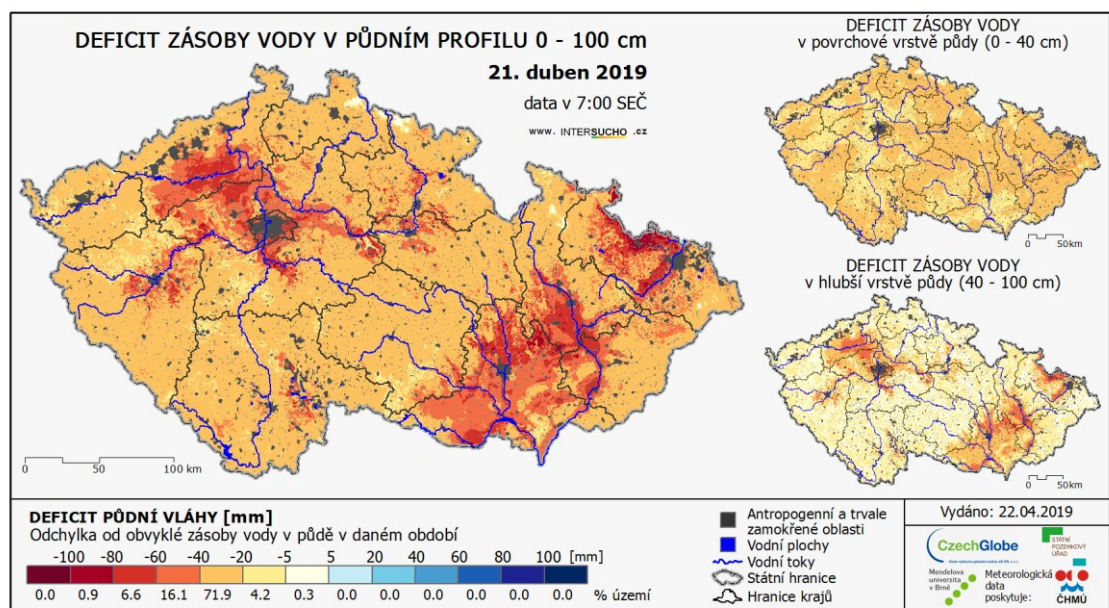
Sucho je velmi neurčitý jev projevující se nedostatkem vody. Je charakteristické svým překvapivým a nepravidelným výskytem. V první části práce bylo detailně popsáno samotné sucho. Představeny byly jeho příčiny, možné dopady, typy a indexy, pomocí kterých můžeme sucho měřit. Součástí studie je detailní fyzickogeografická charakteristika vymezeného území doplněná o mapové výstupy. Předložená práce analyzovala hydrologické sucho v ne příliš atraktivní, avšak suchem velice ohrožené oblasti. Sucho bylo hodnoceno na základě datových řad průtoků a dvou metod definujících hydrologické sucho. Díky dlouhodobé řadě průtoků bylo možno porovnávat jednotlivé hydrologické roky mezi sebou. Nejpodstatnějším zjištěním byl zřejmý nástup hydrologického sucha v posledních letech, zejména tedy od roku 2014. Pro detailnější analýzu byly proto vybrány poslední dva hydrologické roky. Rok 2018 je považován za hydrologicky nejsušší rok v celém pozorovaném období. Suchá perioda v tomto roce trvala dlouhých 125 dní z celého roku. Výsledky dále dokazují, že hydrologické sucho v povodí Loděnice se váže převážně k měsícům srpnu a září.

Lidé berou vodu jako samozřejmost, o kterou lidstvo nikdy nemůže přijít. V poslední době však společnost začíná chápat sucho jako jednu z dalších přírodních hrozeb. Čím delší a intenzivnější sucho je, tím je zájem společnosti větší. Suchá perioda trvající od roku 2014 dává vědcům za pravdu, že výskyt sucha na našem území není pouze náhodou. Celé období od roku 2014 do konce roku 2018 bylo teplotně velmi mimořádné a srážkově chudé. Zároveň v zimních obdobích nebyla dostatečná sněhová pokrývka, která by výskytu sucha zabránila nebo ho alespoň dostatečně zmírnila. Společnost si však problematiku sucha začíná uvědomovat. Nyní je potřeba s ní opravdu něco dělat. Je třeba, aby si lidé vody vážili, neplýtvali s ní a naučili se s ní správně hospodařit.

Pro budoucí analýzu je třeba zvýšit počet hydrologických stanic v povodí. Vyhodnocení hydrologického sucha díky více profilům by přineslo mnohem detailnější pohled na tento novodobý fenomén, kterého je třeba se v této oblasti obávat. Tato práce by měla sloužit jako možné varování při boji proti suchu nejen v tomto povodí. Otázka sucha je zajímavá pro další navazující práce, které budou bez pochyby třeba. Současný stav a budoucí prognózy sucha nejsou pro Česko příznivé.



Obrázek 15: Intenzita sucha ke dni 21. 4. 2019. Zdroj: www.intersucho.cz.



Obrázek 16: Deficit půdní vláh ke dni 21. 4. 2019. Zdroj: www.intersucho.cz.

8. POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE DAT

8.1 Literatura

- ALLEY, M. W. (1984): The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of climate and applied meteorology*, 23, 7, 1100–1109.
- BALATKA, B., KALVODA J. (2006): Geomorfologické členění reliéfu Čech. Kartografie Praha. Praha.
- BELDA, M., HALENKA, T., KALVOVA, J., HOLTANOVA, E. (2014): Climate classification revisited: From Köppen to Trewartha. *Climate Research*, 59, 1–13.
- BÍNA, J., DEMEK, J. (2012): Z nížin do hor – geomorfologické jednotky České republiky. Academia, Praha.
- BLINKA, P. (2009): Klimatologické hodnocení sucha na území Čech a Moravy v letech 1875–2002. Disertační práce. PřF UK, Praha, 139 s.
- BRÁZDIL, R., TRNKA, M. a kol. (2015): Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i, Brno, 402 s.
- CULEK, M. a kol. (1995): Biogeografické členění ČR. Enigma, Praha.
- ČERVENÝ, J. a kol. (1984): Podnebí a vodní režim ČSSR. SZN, Praha.
- DEMEK, J. (1987): Obecná geomorfologie. Academica, Praha.
- ESTRELA, T. a kol. (2001): Extreme hydrological events: floods and droughts. Environmental issue report No. 21: Sustainable water use in Europe, Part 3. European Enviroment Agency, 84 s.
- GIBBS, W. J. (1975): Drought – its definition, delineation and effects. In: Special Environmental Report No. 5. World Meteorological Organization, Geneva, 11–39.
- GUMBEL, E. J. (1963): Statistical forecast of droughts. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* 8, 5–23.

- HISDAL, H., STAHL, K., TALLAKSEN, L. M., DEMUTH, S. (2001): Have droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, 21, 3, 317–333.
- HLADNÝ, J. (2009): Druhy sucha. In: Němec, J., Kopp, J. (eds.): *Vodstvo a podnebí v České republice*. Ministerstvo zemědělství České republiky, Consult Praha, 66 s.
- CHLUPÁČ, I. (1988): *Geologické zajímavosti pražského okolí*. Academia, Praha.
- JANSKÝ, B. (2017): Vstupuje lidstvo do globální vodní krize? *Geografické rozhledy*, 27, 1, 4–7.
- JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2007): Retenční potenciál v pramenných oblastech toků. In: Langhammer, J. (ed.): *Povodně a změny v krajině*. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze a Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha, 307–315.
- JOHANOVSKÝ, Z., WOLF, P. a kol. (1985): Hodnocení suchého období let 1982–4 v profilech vybraných nádrží ČSR. ČHMÚ, Praha, 36 s.
- KAŠPÁREK, L., MRKVIČKOVÁ, M. (2009): Studie dopadů klimatické změny na hydrologické poměry v povodí Blšanky a návrh adaptačních opáření. *VÚV T.G.M.*, 51, 19–22.
- KVÁŠOVSKÝ, J. (2005): Jakost povrchových vod a znečištění sedimentů těžkými kovy v povodí Loděnice. Diplomová práce. PřF UK, Praha, 195 s.
- MAROUŠKOVÁ, K. (2016): Projevy a dopady hydrologického sucha v povodí Rakovnického potoka. Diplomová práce. PřF UK, Praha, 108 s.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N., KLEIST, N. J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time steps. In: *Preprints 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, January 17–22, 179–184.
- MÍSAŘ, Z. (1983): *Geologie ČSSR I: Český masív*. SPN, Praha.
- MÜLLER, V. a kol. (1991): *Vysvětlivky k souboru geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů – Kladno, Beroun*. Český geologický ústav, Praha.
- NALBANTIS, I., TSAKIRIS, G. (2009): Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23, 881–897.

- NĚMEC, J. HLADNÝ, J. (2006): Voda v České republice. Consult Praha, Praha, 256 s.
- NIEMEYER, S. (2008): New drought indexes. In: Lopéz–Francos, A. (ed.): Drought Management: scientific and technological Innovations. CIHEAM, Zaragoza, 267–274.
- NOVICKÝ, O. a kol. (2009): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Zpráva za rok 2009. VÚV T.G.M., Praha, 59 s.
- PALMER, W. C. (1965): Meteorological drought. Research Paper No. 45. U.S. Weather Bureau, 59 s.
- PEÑA–GALLARDO, M. a kol. (2019): Complex influences of meteorological drought time–scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous United States. *Journal of Hydrology*, 568, 611–625.
- PRŮŠA, J. (1989): Přirozené lesy. Academia, Praha.
- QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Československá akademie věd, Brno.
- ŘIČICOVÁ, P. a kol. (2003): Sucho v českých povodích v roce 2003 a v minulých desetiletích. In: Sborník příspěvků k Workshopu 2003, ČVUT, Praha, 103–112.
- SHAFER, B. A., DEZMAN, L. E. (1982): Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: Proceedings of the Western Snow Conference. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 164–175.
- SHUKLA, S., WOOD, A. W. (2008): Use of standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35, 2, 226–236.
- STAHL, K. (2001): Hydrological drought – A Study Across Europe. Dissertation Thesis. Albert–Ludwig Universität, Freiburg, 121 s.
- SYROVÝ, S. (1958): Atlas podnebí ČSR. Ústřední správa geodézie a kartografie, Praha.
- ŠACHOVÁ, B. (2013): Vliv klimatické změny na hydrologické sucho v povodí horní Otavy. Diplomová práce. PřF UK, Praha, 104 s.

TALLAKSEN, L. M., VAN LANEN, H. A. (2004): Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science 48. Elsevier Science B. V., Amsterdam, 579 s.

TOMÁŠEK, M. (2007): Půdy České republiky. Český geologický ústav, Praha.

TRNKA, P. (2010): Možné důsledky dlouhotrvajícího sucha v naší krajině a ve světě. Ústav aplikované a krajinné ekologie AF MENDELU, Brno.

TREML, P. (2011): Největší sucha na území České republiky v období let 1875–2010. Meteorologické zprávy, 64, 6, 168–176.

VLNAS, R. (2015): Návrh koncepce řešení krizové situace výskytu sucha a nedostatku vody v ČR. VÚV, 52 s.

VOREL, Č. (1937): Sucha na území Československé republiky v posledních desetiletích. Práce a studie, sešit 22. Státní ústavy hydrologický a hydrotechnický T. G. Masaryka, Praha, 14 s.

WEGHORST, K. (1996): The Reclamation Drought Index: Guidelines and practical applications. In: Bathala, C. (ed.): North American Water and Environment Congress & Destructive Water. American Society of Civil Engineers, New York, 637–642.

WILHITE, D. A., VANYARKHO, O. (2000): Drought: Pervasive impacts of a creeping phenomenon. In: Wilhite, D. A. (ed.): Drought: A Global Assessment. Routledge publishers, London, 245–255.

WILHITE, D. A., GLANTZ, M. H. (1985): Understanding the drought phenomenon: The role of definitions, Water International, 10, 3, 111–120.

8.2 Digitální a datové zdroje

AOPK (2019): Přírodní poměry. Dostupné z: <https://gis.nature.cz/arcgis/rest/services/PrirodniPomery> (cit. 10. 2. 2019).

ARCDATA PRAHA (2016): ArcČR – Digitální geografická databáze, verze 3.3. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500> (cit. 10. 4. 2019).

ČGS – Česká Geologická služba. Dostupné na: www.geology.cz (cit. 3. 3. 2019).

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz> (cit. 14. 1. 2019).

DANĚLKA, J. a kol. (2019): Předběžná zpráva o suchu 2018. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2019/Predbezna_zprava_o_suchu_2018.pdf (cit. 10. 4. 2019).

Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD). Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. Dostupné z: <http://www.dibavod.cz/> (cit. 8. 3. 2019).

GEOLOGICKÁ MAPA 1:50 000 (2018): Geovědní mapy 1:50 000. Dostupné z: <https://www.mapy.geology.cz/geocr50/> (cit. 10. 2. 2019).

INTERSUCHO. Ústav výzkumu globální změny AV ČR. Dostupné z: <https://www.intersucho.cz/> (cit. 1. 4. 2019).

NDMC (National Drought Mitigation Center) (2012): Droughts Basic. Types of drought. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska–Lincoln, U.S.A. Dostupné z: <http://www.drought.unl.edu/DroughtBasics/TypesofDrought.aspx> (cit. 10. 3. 2019).

9. SEZNAM TABULEK, GRAFŮ A OBRÁZKŮ

9.1 Tabulky

<i>Tabulka 1: Vybrané rybníky v povodí Loděnice</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 2: Klimatické oblasti MT11, T2 a jejich charakteristiky</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 3: Extrémní hodnoty průměrných denních průtoků ve sledovaném období</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 4: Hodnoty M–denních průtoků pro profil Loděnice za celé pozorované období</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 5: Roční odtok v nejvodnatějších a nejsušších letech</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 6: Pravděpodobnost překročení průměrných ročních průtoků za celé pozorované období</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7: Nedostatkové objemy v pozorovaném období 1977–2018</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 8: Extrémní hodnoty průtoků v roce 2017</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 9: Extrémní hodnoty průtoků v roce 2018</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 10: Hodnoty M–denních průtoků pro profil Loděnice za rok 2017</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 11: Hodnoty M–denních průtoků pro profil Loděnice za rok 2018</i>	<i>61</i>

9.2 Grafy

<i>Graf 1: Hydrogram znázorňující denní průtoky za celé sledované období</i>	<i>47</i>
<i>Graf 2: Roční minima v pozorovaném období 1977–2018</i>	<i>48</i>
<i>Graf 3: Křivka překročení M–denních průtoků za celé pozorované období</i>	<i>49</i>
<i>Graf 4: Dlouhodobé průměrné měsíční průtoky pro profil Loděnice</i>	<i>49</i>
<i>Graf 5: Podíl jednotlivých měsíců na ročním objemu odtoku pro profil Loděnice (1977–2018)</i>	<i>50</i>
<i>Graf 6: Podíl ročních období na ročním objemu odtoku pro profil Loděnice (1977–2018)</i>	<i>50</i>
<i>Graf 7: Hydrogram znázorňující průměrné roční průtoky v jednotlivých letech na profilu Loděnice</i>	<i>51</i>
<i>Graf 8: Počet suchých dní v jednotlivých letech</i>	<i>53</i>
<i>Graf 9: Sezónní rozložení suchých dní na profilu Loděnice ve sledovaném období</i>	<i>54</i>
<i>Graf 10: Nedostatkové objemy v pozorovaném období 1977–2018</i>	<i>55</i>
<i>Graf 11: Chod denních průtoků v hydrologickém roce 2017</i>	<i>56</i>
<i>Graf 12: Chod denních průtoků v hydrologickém roce 2018</i>	<i>57</i>

<i>Graf 13: Průměrné měsíční průtoky v hydrologickém roce 2017</i>	<i>58</i>
<i>Graf 14: Průměrné měsíční průtoky v hydrologickém roce 2018</i>	<i>59</i>
<i>Graf 15: Podíl měsíců na ročním objemu odtoku v roce 2017</i>	<i>59</i>
<i>Graf 16: Podíl měsíců na ročním objemu odtoku v roce 2018</i>	<i>60</i>
<i>Graf 17: Křivka překročení M–denních průtoků pro rok 2017</i>	<i>60</i>
<i>Graf 18: Křivka překročení M–denních průtoků pro rok 2018</i>	<i>61</i>
<i>Graf 19: Počet dní pod hranicí hydrologického sucha roce 2017 v jednotlivých měsících</i>	<i>62</i>
<i>Graf 20: Počet dní pod hranicí hydrologického sucha roce 2018 v jednotlivých měsících</i>	<i>62</i>
<i>Graf 21: Nedostatkové objemy suché periody roku 2017</i>	<i>63</i>
<i>Graf 22: Nedostatkové objemy suché periody roku 2018</i>	<i>63</i>
<i>Graf 23: Chod denních průtoků v hydrologickém roce 2013</i>	<i>65</i>
<i>Graf 24: Průměrné měsíční průtoky v hydrologickém roce 2013</i>	<i>66</i>
<i>Graf 25: Podíl měsíců na ročním objemu odtoku v roce 2013</i>	<i>66</i>
<i>Graf 26: Průměrné denní průtoky v období od 30.5. do 15.6.</i>	<i>68</i>

9.3 Obrázky

<i>Obrázek 1: Schematická mapa povodí</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2: Geomorfologické poměry v povodí Loděnice</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3: Geologické poměry v povodí Loděnice</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 4: Hydrografická síť vybraného povodí</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5: Hustota říční sítě</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 6: Třtický rybník</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 7: Bioregiony v povodí Loděnice</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 8: Pedologické poměry v povodí Loděnice</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 9: Klimatické poměry v povodí Loděnice</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10: Limnigrafická stanice Loděnice – 198400 (hlásný profil č. 207)</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 11: Projevy sucha v srpnu roku 2018 na horní části toku</i>	<i>64</i>

<i>Obrázek 12: Projevy sucha v srpnu roku 2018 na horní části toku</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 13: Ukazatel nasycení k 1.6. 2013 8:00 SELČ</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 14: Povodně v roce 2013 v obci Kamenné Žehrovice</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 15: Intenzita sucha ke dni 21. 4. 2019</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 16: Deficit půdní vláhky ke dni 21. 4. 2019</i>	<i>74</i>